

文章编号 1004-924X(2018)06-1470-10

基于增强拉东变换及稀疏先验的模糊星斑复原

郑天宇^{1,2,3}, 尹达^{-1,2*}

(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: 为了提高动态条件下星光导航系统星斑质心定位精度, 本文提出了一种新的模糊星斑复原算法。首先, 分析了星斑图像退化模型, 得出了星斑质心定位精度与星斑信噪比呈正相关的关系。对于载体角运动和载体振动两个因素引起的模糊星斑复原过程分成粗级复原和精级复原两个步骤。接着分析了噪声对拉东(Radon)变换的影响, 提出基于灰度拉伸的改进 Radon 变换算法进行粗复原。最后, 根据清晰星斑的梯度分布稀疏先验正则化, 利用迭代盲复原算法对星斑进行精复原。仿真实验结果表明, 本文提出的两步模糊星斑复原算法较传统算法复原后星斑峰值信噪比(PSNR)提高 30%, 质心定位精度提高 55%。

关键词: 运动模糊; 星斑复原; 拉东变换; 稀疏先验; 迭代盲复原

中图分类号: TP753; P171 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1470

Blurred star restoration based on improved Radon transform and sparse prior

ZHENG Tian-yu^{1,2,3}, YIN Da-yi^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: yindayi@mail.sitp.ac.cn

Abstract: A New blurred star spot restoration algorithm was proposed to improve the accuracy of the centroiding of star of the star navigation system under dynamic conditions in this paper. Firstly, the star blurring model was analyzed, and the conclusion that the accuracy of the centroiding of the star increased with the signal to noise ratio(SNR) was obtained. The recovery of the blurred star was divided into coarse and fine steps for the carrier angular motion and vibration. The effect of noise on Radon transform was analyzed, and an improved Radon transform algorithm for gray stretching was proposed. Finally, the iterative blind restoration algorithm was used to perform the precise restoration of star spot based on the sparse prior regularization of the gradient distribution of the clear star spot. The simulation and experimental results show that the peak signal to noise ratio (PSNR) of the two

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2017-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40776100)

step blurred star spot restoration algorithm is improved by 30% and the precision of centroid positioning is improved by 55%, compared with the traditional algorithm.

Key words: motion blur; star restoration; Radon transform; sparse prior; iterative blind restoration

1 引言

星光导航系统(如星敏感器、精细导星仪等)中,星斑质心定位精度决定了载体的姿态解算精度^[1]。探测器曝光时间内,由于视轴漂移,载体振动等因素导致像面上星斑产生拖尾模糊现象^[2],是图像退化的一种。模糊星斑能量分散在多个探测器像元上,每个像素接收到的平均能量降低,由于探测器读出噪声、暗电流等噪声的存在使星斑信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)降低,进而导致星斑质心定位精度降低,严重时会发生姿态解算错误^[3]。所以,研究星光导航系统如何复原退化模糊星斑图像,提高星斑质心定位精度就显得十分必要。

解决上述问题的方法主要分为两种,近年来研究者主要致力于质心补偿算法^[4-6]和模糊星斑复原算法^[7-8]。质心补偿算法主要应用在星斑有效区域提取成功的前提下,当星斑运动距离过长、星图信噪比较低的情况下质心补偿法将失效。模糊星斑复原算法可以将运动模糊且能量较低的星斑复原为清晰且能量集中的星斑。模糊星斑复原算法包含模糊核估计和复原两个步骤,利用陀螺或者卫星姿态估计出的模糊核误差较大^[9],从原始图像中计算模糊核可得到较为精确的结果。运动模糊图像经过傅里叶变换后能够观察到条纹现象,通过 Radon 变换能够检测出运动方向,但估计结果对图像噪声较为敏感^[10]。传统的 Wiener 滤波器方法复原后图像振铃效应明显^[11]。正则化方法能够有效的抑制振铃和噪声,但是对于运动参数估计误差较敏感^[12]。图像盲复原方法在模糊核未知情况下利用先验知识可以在单幅图像中得到模糊核和清晰图像,适用于模糊核较小的情况^[13]。

本文提出了一种改进 Radon 变换的方法,在近似直线运动模糊核估计过程中有效减小了图像噪声的干扰,并根据估计出的模糊核进行粗级复原;同时,根据清晰图像梯度满足稀疏先验,利用正则化方法进行图像盲复原,完成模糊星斑精级

复原。

2 星斑退化模型

载体静止时,恒星在焦平面上的像为近似高斯函数的星斑,其能量分布在理想情况下可以表示为:

$$I(x, y) = \frac{\Phi}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 是坐标为 (x, y) 的像元接收到的恒星辐射功率; Φ 为探测器接收到的全部恒星辐射功率; σ_{PSF} 为弥散斑束腰宽度。根据高斯函数的性质,星斑区域在 $3\sigma_{\text{PSF}}$ 范围内包含了星斑 99.7% 的能量。

空间中载体机动、动量轮运动以及制冷机的振动等会使视轴指向发生漂移或抖动。在曝光时间内视轴的指向变化会反映到焦面上像斑的运动,设像斑中心位置 x_0, y_0 随时间的函数为:

$$x_0 = f_x(t), y_0 = f_y(t). \quad (2)$$

探测器输出图像为高斯函数下各像素在空间和时间上的三重积分,如式(3):

$$I(m, n) = \int_0^{t_0} \int_{m-0.5}^{m+0.5} \int_{n-0.5}^{n+0.5} I(x, y) dx dy dt, \quad (3)$$

式中 t_0 为积分时间, m, n 为探测器水平、竖直方向像元数。

联立式(1)、(2)、(3)得焦面上成像星斑能量分布为:

$$I(m, n) = \int_0^{t_0} \int_{m-0.5}^{m+0.5} \int_{n-0.5}^{n+0.5} \frac{\Phi \times t_0}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-f_x(t))^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y-f_y(t))^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right] dx dy dt. \quad (4)$$

由式(4)得到原始星斑与拖尾星斑如图1所示。

在积分时间内,图像传感器沿星光斑的运动轨迹对高斯光斑能量信号进行连续积分,视轴的角运动造成星点光斑被拉长,星斑能量分布在更多像元上,像素平均能量降低。由于探测器读出噪声、暗电流、电路噪声等的存在,会使星斑信噪比(SNR)降低。星斑所在窗口区域内信噪比定

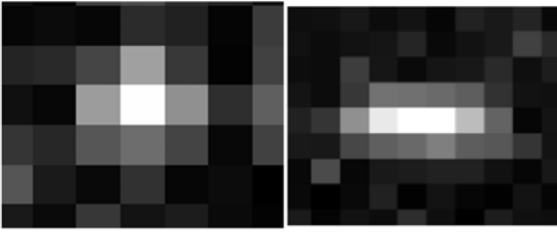


图 1 原始星斑与拖尾星斑

Fig. 1 Original star-spot and blurred star-spot
义为:

$$R_{\text{SNR}} = \frac{I_{\text{pix}}}{\sigma_I} = \frac{I_{\text{total}}}{N \cdot \sigma_I}, \quad (5)$$

式中: I_{pix} 为平均每个像元的能量, σ_I 为探测器单个像元所有噪声均方差, I_{total} 为区域内像斑总能量, N 为模糊星斑所占像元数。

设载体静止时星斑所占像元数为 $N = N_0 \cdot N_0$, 模糊星斑运动长度为 L , 则模糊星斑所占像元数为 $N' = N_0 \cdot L$, L 一般远大于 N_0 , 模糊星斑信噪比 R'_{SNR} 与静止清晰星斑信噪比 R_{SNR} 比值为:

$$\frac{R'_{\text{SNR}}}{R_{\text{SNR}}} = \frac{I_{\text{total}}}{N_0 \cdot L \cdot \sigma_I} \bigg/ \frac{I_{\text{total}}}{N_0 \cdot N_0 \cdot \sigma_I} = N_0/L < 1. \quad (6)$$

由式(6)知, 由于星斑运动模糊现象的存在, 使星斑信噪比降低, 最终影响质心定位精度。载体角运动和振动都会引起不同程度的星斑图像退化, 降低星斑质心定位精度, 因此有必要对模糊星斑进行复原。

3 星图粗级复原

3.1 增强拉东变换

运动模糊星斑图像可以看做是清晰星斑在运动路径不同位置上对时间的连续积分。由于积分时间短, 可以将光轴的角运动等效为焦面上星斑的匀速直线运动。设积分时间为 T , 星斑在焦面沿 x 和 y 方向上运动距离分别为 l_x , l_y , 则运动模糊星图可表示为:

$$g(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T f[x - x_0(t), y - y_0(t)] dt, \quad (7)$$

$$x_0(t) = \frac{l_x \cdot t}{T}, y_0(t) = \frac{l_y \cdot t}{T}. \quad (8)$$

对式(7)进行傅里叶变换后化简得到:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T e^{-j2\pi[ux_0(t) + vy_0(t)]} dt. \quad (9)$$

同时, 在位移空间不变性成像系统中运动退化星图 $g(x, y)$ 可以表示为原始星图 $f(x, y)$ 与模糊核 $h(x, y)$ 的二维卷积模型:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (10)$$

其中: $n(x, y)$ 为加性噪声, $*$ 为卷积操作。

忽略掉噪声项对式(10)进行傅里叶变换得到:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v), \quad (11)$$

式中 $H(x, y)$ 为模糊核函数的傅里叶变换。

联立式(9)、(11)可得:

$$H(u, v) = \frac{1}{T} \int_0^T e^{-j2\pi[ux_0(t) + vy_0(t)]} dt = \frac{\sin[\pi(ul_x + vl_y)]}{\pi(ul_x + vl_y)} e^{-j\pi(ul_x + vl_y)}. \quad (12)$$

设图像大小为 $M \times N \text{ pixel}$, 则以像素为单位, 忽略掉相位相关项, 式(12)模糊核幅度谱可表示为:

$$|H(u, v)| = \left| \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{ul_x}{M} + \frac{vl_y}{N}\right)\right]}{\pi\left(\frac{ul_x}{M} + \frac{vl_y}{N}\right)} \right|, \quad (13)$$

式(13)模糊核的幅度谱类似于 SINC 函数, 具有周期性的零值点, 可以看出模糊退化星图的幅度谱是 $|H(u, v)|$ 对原始星图幅度谱的调制, 所以退化星图幅度谱中包含类似 SINC 函数的明暗相间的条纹。根据文献[9]可知, 星点的运动方向与水平方向的夹角 β 和运动长度分别为:

$$\tan \beta = \tan\left[\alpha - \frac{\pi}{2}\right] \cdot \frac{N}{M}, \quad (14)$$

$$l = \frac{2M}{D \sqrt{(\cos \beta)^2 + (\sigma \cdot \sin \beta)^2}}, \quad (15)$$

式中: α 为退化星图幅度谱中条纹的斜率, M 、 N 为图像尺寸, D 为中央亮条纹的宽度。效果如图 2 所示。条纹的斜率可以通过 Radon 变换得到。一个平面内沿不同的直线(直线与原点的距离为 p , 方向角为 θ)对函数 $f(x, y)$ 做线积分得到的像 $F(p, \theta)$ 就是函数 f 的 Radon 变换。改进 Radon 变换如式(16)所示, 将 f 乘灰度拉伸函数后进行线积分。

$$R_f(p, \theta) = F(p, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(f(x, y)) f(x, y) dl. \quad (16)$$

前文传统的 Radon 变换过程中忽略了图像噪声项, 当考虑成像时引入的噪声后, 幅度谱中条

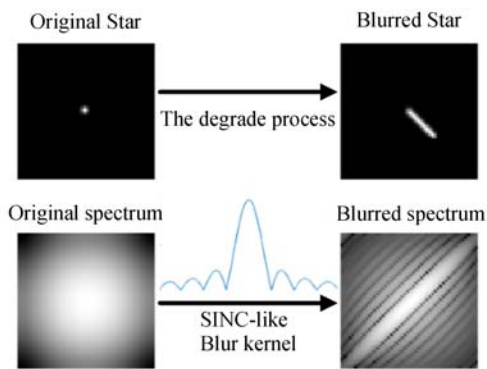


图 2 星斑频谱图

Fig. 2 Spectrum of star spot

纹对比度会降低, 甚至消失, 从而导致 Radon 变换的运动角度检测精度降低。为了减小噪声对运动角度检测的干扰, 本文提出了基于灰度拉伸的 Radon 变换增强的方法。

定义分段函数 $Z(x)$ 作用于退化星斑频谱图对其非线性拉伸, 突出明暗条纹的变化同时减小噪声。

$$Z(g(x, y)) = \begin{cases} 0 & , g(x, y) \leq a \\ \frac{2(g(x, y) - b)^2}{(b - a)^2}, & a < g(x, y) \leq \frac{a + b}{2} \\ 1 - \frac{2(g(x, y) - a)^2}{(b - a)^2}, & \frac{a + b}{2} < g(x, y) \leq b \\ 1 & , a < g(x, y) \end{cases} \quad (17)$$

其中 $g(x, y)$ 为图像 (x, y) 点处像素的灰度值, 参数 a, b 为分段函数的两个阈值。函数图像如图 3 所示。由图可知函数 $Z(x)$ 对某一范围像素均有正向放大作用, 对某一部分像素具有反向拉伸作用。

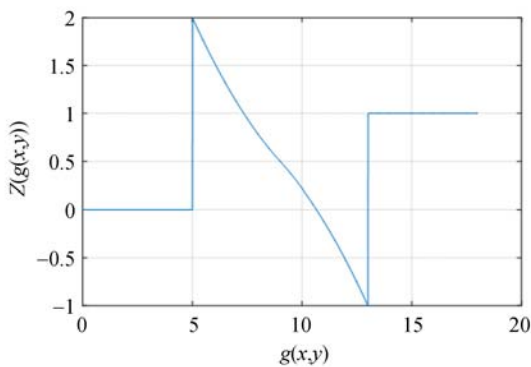


图 3 灰度拉伸函数

Fig. 3 Gray stretching function

对于运动模糊参数的估计, 只需关注中央亮条纹的清晰度及对比度, 为了突出中央亮条纹, 对两边第一次暗条纹进行反向拉伸, 同时对其他亮条纹进行正向拉伸。为了确定参数 a, b 的取值, 根据系统数仿真得到一幅高斯束腰为 0.7, 峰值像素值为 261, 运动方向为 45° , 运动长度为 14 pixel 的无噪声模糊星斑。测得中央亮条纹和第一次亮条纹以及第二次亮条纹的最大值分别为 8.8、7.1、6.5, 根据大量实验, 选取参数 $a=4, b=8$ 可达到增强中央亮条纹的效果, 且参数 $a > b$ 只依赖于系统的光学及探测器参数, 与具体运动长度及方向无关。

图 4 展示了灰度拉伸效果, 图 4(a)、图 4(b) 分别为被噪声污染的运动模糊星斑频谱图和与之相对应的经过灰度拉伸处理的频谱图。经过灰度拉伸局部噪声被抑制同时条纹的对比度变高, 更重要的是, 中央亮条纹得到显著突出, Radon 变换检测出的运动角度误差范围变小, 由双极点优化为单极点。

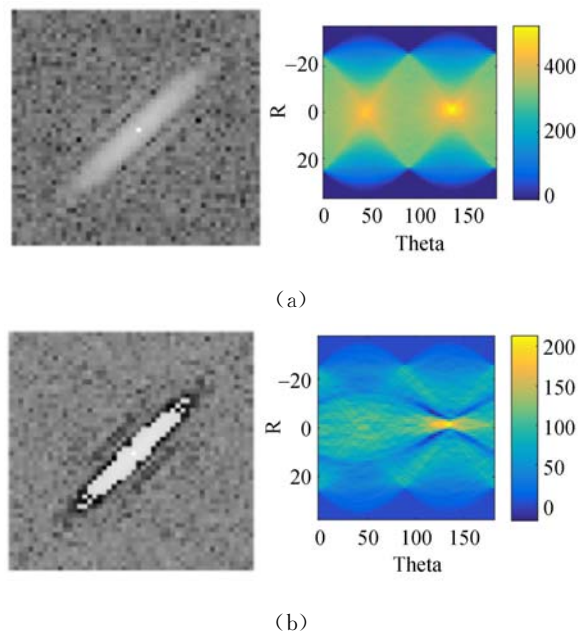


图 4 增强 Radon 变换效果

Fig. 4 Result of improved Radon transform

3.2 断裂星斑修复

在载体大角速度的情况下, 成像星斑拖尾长度较长, 灰度值较低; 在探测器非均匀噪声的影响下, 滤波和阈值分割过程都有可能使拖尾星斑某些像素值为 0, 即存在星斑“断裂”现象。断裂星斑如果不做处理会产生伪星, 影响星斑定位或星

图识别结果。

针对拖尾星斑断裂现象,本文提出一种预测膨胀算法对断裂星斑进行修复;首先预测出星斑断裂方向 θ_q 及由断裂引起的缺失长度 l_q ,然后在 θ_q 方向以 l_q 为长度对断裂星斑进行膨胀操作。算法具体步骤为:

(1)对整幅图像各有效连通域星斑(包括断裂星斑)执行 3.1 节所述算法,计算其拖尾长度及方向 θ_q 。同时记录各连通域起始点坐标;

(2)统计各个星斑拖尾长度并选择最大值作为真实拖尾长度,明显小于真实拖尾长度的星斑标记为断裂星斑。搜索各连通域起始点之间的距离,若两个连通域距离小于真实拖尾长度,则为同一星斑的两个断裂部分,缺失长度 l_q 为二者拖尾长度之和与真实拖尾长度的差值;

(3)计算出缺失长度及运动方向后,对这两个连通域进行膨胀处理,最后得到修补后的星斑图像。

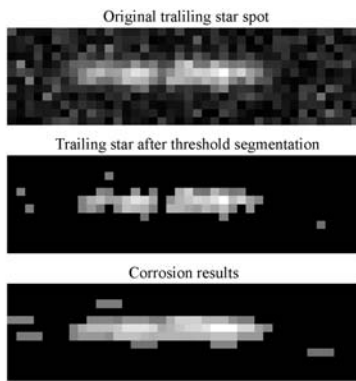


图 5 断裂星斑修复效果
Fig. 5 Fracture star spot repair

使用 Radon 变换检测出星斑角运动长度和方向后可以使用 RL 反卷积方法对退化星图进行粗级复原。

4 基于稀疏先验的模糊星图精级复原

粗复原可以消除载体角运动对恒星成像的影响,但载体的不规则振动引起的星斑退化现象依然存在,所以对星斑进行更加精细的复原操作是很有必要的。

进行精级复原时,由于此时无法获取准确的运动模糊核,此时要恢复出未知的原始图像是一个“病态”问题,存在多解。模糊核未知的图像复原称为盲复原,对于图像盲复原算法一般会利用

原始清晰图像以及模糊核的先验知识,以此作为约束进行迭代运算,最后估计出原始图像和模糊核。

根据贝叶斯最大后验概率估计(Maximum APosteriori, MAP)原理,由模糊图像解出原始图像和模糊核的后验概率 $P(l, f|b)$ 可表示为:

$$P(l, f|b) \propto P(b|l, f) P(l, f) = P(b|l, f) P(l) P(f), \quad (18)$$

式中: $P(l)$ 、 $P(f)$ 分别表示清晰图像和模糊核的先验估计, $P(b|l, f)$ 为似然函数。上式两侧取负对数,最大化后验概率 $P(l, f|b)$ 等效为最小化负对数, $E(l, f|b) = -\log P(l, f|b)$:

$$E(l, f|b) = -\log P(l, f|b) + constant = \phi(l * f - b) + \lambda_1 \Psi(l) + \lambda_2 r(f) + constant, \quad (19)$$

式中: l 为原始清晰图像, f 为模糊核, b 为模糊图像, $\Psi(\cdot)$ 、 $r(\cdot)$ 为正则约束函数, $\Phi(\cdot)$ 为保真项, λ_1 、 λ_2 为约束权值。复原算法的目标就是寻找使正则约束项最小的 l, f 。

对于保真项一般选用高斯先验模型,有利于构造出凸优化函数。待估计的原始星图其梯度分布较为稀疏,约束函数在此选取图像梯度的 l_p 范数。此时星斑精细复原数学模型为:

$$\min_{l, f} \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \lambda_1 \|\nabla l\|_{p_1} + \lambda_2 \|f\|_{p_2}, \quad 0 < p_1 - p_2 \leq 1, \quad (20)$$

式中 $\|\cdot\|_p$ 表示 l_p 范数 ($0 < p \leq 1$)。清晰星斑像素分布紧凑,梯度分布比模糊星斑较为稀疏。文献[14]证明了 l_p 范数 ($0 < p \leq 1$) 能够较好的突出图像的稀疏性,这里我们选取对星图的梯度分布作为稀疏约束。图 6 显示了具有 2 500 (50×50) pixels 的清晰星图和模糊星图方向的梯度分布,由图可知,清晰星图梯度分布较稀疏。

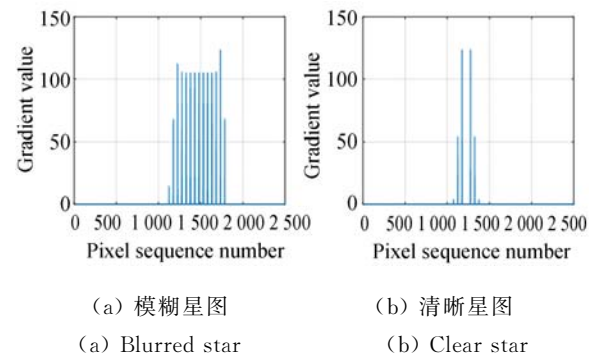


图 6 星图梯度稀疏分布
Fig. 6 Sparsity distribution of star gradient

$$\|\nabla l\|_p = \Psi(\nabla_x l, \nabla_y l) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(\nabla_x l)_i^2 + (\nabla_y l)_i^2})^p, \quad (21)$$

式中: $0 < p \leq 1$, ∇_x, ∇_y 为图像某像素 x 和 y 方向上的空间梯度, N 为图像总像素数。模糊核 f 约束同样满足归一化稀疏性:

$$r(f) = \|f\|_p = \sum_{i=1}^N \varphi(f_i)^p, 0 < p \leq 1, \quad (22)$$

$\varphi(f_i)$ 满足以下约束:

$$\varphi(f_i) = \begin{cases} f_i, & f_i \geq \varepsilon \\ 0, & f_i < \varepsilon \end{cases}, (\varepsilon \text{ is a small threshold}), \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^N \varphi(f_i) = 1. \quad (24)$$

为了求解式(20), 本文使用交替迭代法, 分别迭代求解出清晰星斑和模糊核 f 。式(20)的求解可以分解为以下两个子问题:

(1) 已知 f 求解 l :

$$\min_l \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \lambda_1 \Psi(\nabla_x l, \nabla_y l). \quad (25)$$

(2) 已知 l 求解 f :

$$l^{n+1} = F^{-1} \left[\frac{\overline{F(f^n)} \circ F(b) + \frac{\alpha}{r} \overline{f(\nabla_x)} \circ F(d_x + c_x) + \overline{F(\nabla_y)} \circ F(d_y + c_y)}{\overline{F(f^n)} \circ F(f^n) + \frac{\alpha}{r} \overline{F(\nabla_x)} \circ F(\nabla_x) + \overline{F(\nabla_y)} \circ F(\nabla_y)} \right], \quad (30)$$

式中: \circ 表示矩阵对应元素相乘, $F(\cdot)$ 表示 FFT 变换, $\overline{F(\cdot)}$ 表示 FFT 复数共轭, $F^{-1}(\cdot)$ 表示傅里叶逆变换。

对于式(29)的求解, 对于像素 i , 构造向量 $m = ([d_x]_i, [d_y]_i)$, $w = (\nabla_x I_i - [c_x]_i, \nabla_y l_i - [c_y]_i)$, 式(29)可重写为:

$$\min_m \lambda_1 \|m\|^p + \frac{\alpha}{2} \|m - w\|^2, 0 < p \leq 1, \quad (31)$$

当 $p=1$ 时式(31)的解为:

$$m = \frac{W}{|w|} * \max \left[|w| - \frac{\lambda_1}{\alpha}, 0 \right], \quad (32)$$

当 $0 < p < 1$ 时, 上式没有解析解, 使用查找表法, 由于 p 是确定值, 分别离散化 w 和 α , 构造关于 m 的二维查找表, 能够很快地计算出 m 。更新的 c_x, c_y 为:

$$\{[d_x^{n+1}]_i, [d_y^{n+1}]_i\} = \text{LUT}_p([\nabla_x l^{n+1} + c_x^n]_i, [\nabla_y l^{n+1} + c_y^n]_i), \quad (33)$$

$$\min_f \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \lambda_2 r(f). \quad (26)$$

4.1 清晰星斑 l 的求解

对于式(25)求解, 此时模糊核 f 为上一次迭代估计出的结果, 使用分裂 Bregman 方法, 引入新变量 $d_x = \nabla_x l, d_y = \nabla_y l$, 分离保真和约束项, 式(25)可重写为:

$$\min_l \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \lambda_1 \Psi(d_x, d_y) + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_x l - d_x - c_x\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_y l - d_y - c_y\|^2, \quad (27)$$

式中 c_x, c_y 为 Bregman 算法待估计的中间惩罚项。则根据 Bregman 迭代, 上式的求解可分解为:

$$\min_l \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_x l - d_x - c_x\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_y l - d_y - c_y\|^2, \quad (28)$$

$$\min_{d_x, d_y} \lambda_1 \Psi(d_x, d_y) + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_x l - d_x - c_x\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla_y l - d_y - c_y\|^2, \quad (29)$$

对于式(28)的求解可将其展开后变换到傅里叶域, 对 l 求导后令其为零可解得 l 的解为:

$$c_x^{n+1} = c_x^n + d_x^{n+1} - \nabla_x l^{n+1}, \quad (34)$$

$$c_y^{n+1} = c_y^n + d_y^{n+1} - \nabla_y l^{n+1}. \quad (35)$$

4.2 模糊核 f 的求解

对于式(26)的求解, 此时清晰图像为上一次迭代估计出的结果, 使用分裂 Bregman 方法, 引入新变量 $d_f = f$ 和待估计的中间惩罚项 e_f :

$$\min_{f, e_f} \frac{r}{2} \|l * f - b\|_2^2 + \lambda_2 z(d_f) + \frac{\beta}{2} \|f - d_f - e_f\|^2, \quad (36)$$

类似 3.1 节, 迭代结果可表示为:

$$f^{n+1} = F^{-1} \left[\frac{\overline{F(l^{n+1})} \circ F(b) + \frac{\beta}{\lambda_2} F(d_f + \theta_f)}{\overline{F(l^{n+1})} \circ F(l^{n+1}) \frac{\beta}{\lambda_2}} \right], \quad (37)$$

$$[d_f^{n+1}]_i = \text{LUT}_p([f^{n+1} - \theta_f^n]_i), \quad (38)$$

$$e_f^{n+1} = e_f^n + d_f^{n+1} - f^{n+1}. \quad (39)$$

通过对 l, f 的多次迭代, 最终得出模糊核和待估计图像, 完成模糊星斑精细复原。

5 仿真实验与复原效果分析

为了验证算法对运动长度及角度等参数的估计精度及模糊星斑复原效果,通过软件模拟得到不同运动形式的模糊退化星斑。实验中的星斑运动长度范围为 10~40 pixels,运动角度范围为 0~90°。如图 9 所示,图 9(a)列四幅图像分别为运动长度为 12 pixel 情况下,运动角度分别为 0°、30°、45°、60°运动模糊星斑。由于随机振动噪声的存在星斑运动轨迹将不再是直线,运动轨迹上像素能量分布变得不均匀。

图 9(b)列为模糊星斑对应的灰度拉伸后的傅里叶频谱图,对其进行 Radon 变换得到运动角度的估计;(c)列为对(b)中结果按估计出的运动角度旋转后按列累加后的结果。经过改进后的 Radon 变换模糊星斑频谱图中央亮条纹变得十分明显,两侧第一谷值较小,容易求得极值点。图 7 和图 8 为不同运动参数下本文算法与传统算法的比较。由图可知,随着运动长度的增加,本文基于改进 Radon 变换的算法估计出的运动长度误差较传统方法小,在运动长度大于 30 pixel 时估计误差为传统方法的 50%。星斑运动角度在 0-90 范围内变化时,改进 Radon 变换算法角度估计精度较传统方法提升很大。

图 9(d)列与(e)分别为模糊星斑粗级复原与

精级复原结果。精级复原过程由于利用了星图梯度稀疏先验,得出的星斑更加紧凑,信噪比更高。

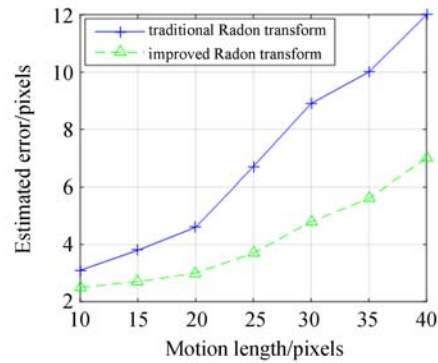


图 7 星斑运动长度估计误差

Fig. 7 Estimation error of star motion length

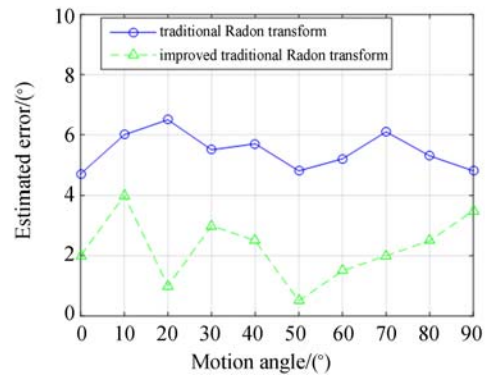
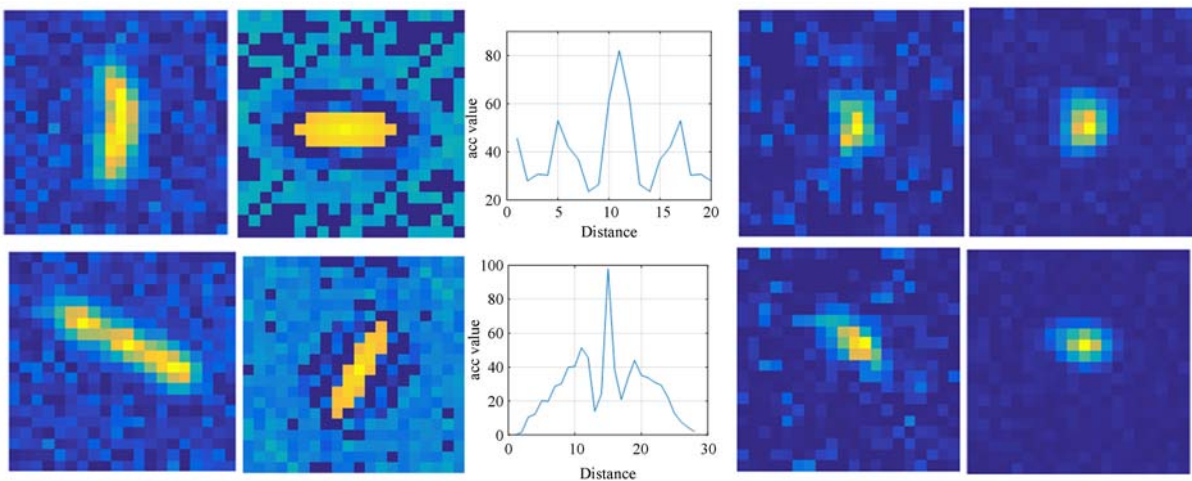


图 8 星斑运动角度估计误差

Fig. 8 Estimation error of star motion angle



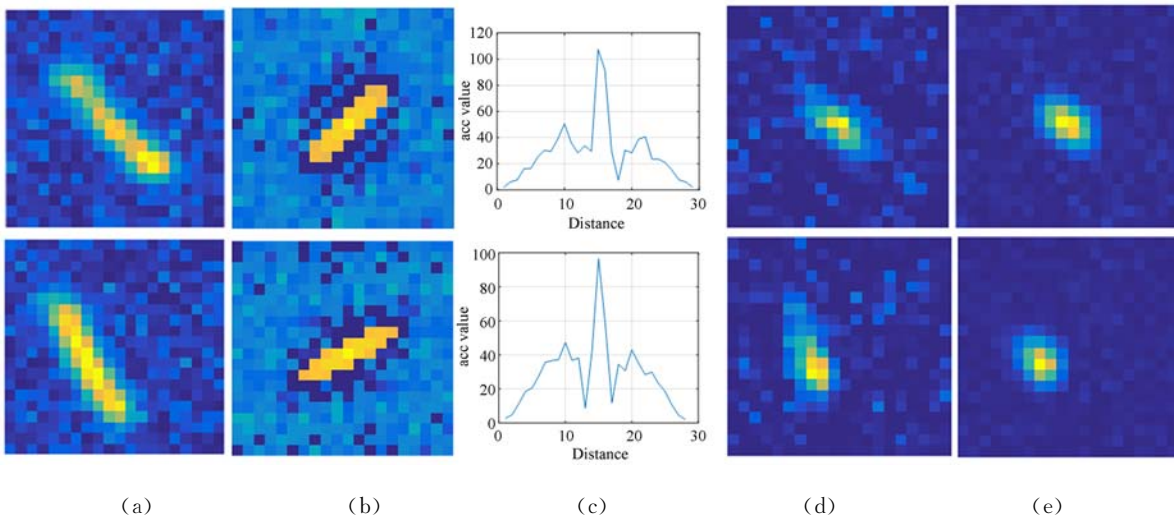


图 9 模糊星斑复原效果

Fig. 9 Results of star restoration

表 1 为不同算法间性能比较结果。由于本文提出的算法对模糊退化星斑采取粗级、精级两步复原,对于不同的模糊星斑复原结果得到的 PSNR 与质心定位精度均高于传统算法。算法运算时间方面,传统 Wiener 滤波方法运行时间最小,但其对噪声敏感,复原效果较差。本文方法虽然较 RL 方法多出粗级复原步骤,但由于利用星图梯度分布稀疏这一先验,大大减少了迭代次数,同时复原效果也得到提高,运算时间上反而小于 RL 方法。

表 1 不同算法间性能比较

Tab. 1 Comparison of different algorithms

	image	RL	Wiener	Our method
PSNR /dB	0°dift	32.58	27.92	41.22
	30°dift	33.17	28.83	39.97
	45°dift	34.97	28.14	42.54
	60°dift	34.56	29.07	41.98
Centroiding accuracy/pixel	0.119	0.153	0.049	
RunningTime/s		4	1.5	3.5

6 实验与结果分析

为了验证本文提出的模糊星斑复原算法在实际成像系统中的效果与性能,搭建了硬件实验平台。实验平台由激光光源、小孔、快速摆动镜、成像相机等组成。激光光源发射平行光经过快摆镜的反射在成像相机上产生模拟星斑。快摆镜由压

电陶瓷驱动,以某一频率摆动,反映到探测器焦面上可等效为光斑在某一方向上的平动,通过设计不同的反射镜摆动情况可模拟真实工况环境下的扰动。

实验系统参数为:探测器像元尺寸 $11 \mu\text{m}$,镜头焦距 100 mm,快摆镜到镜头距离 650 mm。星斑漂移速度由摆镜角速度及摆镜到镜头距离决定。实验平台如图 10 所示。激光光源能量恒定,通过衰减片控制到达探测器上的模拟星光能量,满足一定要求的信噪比。成像相机积分时间设置为固定的 100 ms,比较不同星斑漂移速度下模糊星斑的复原效果。

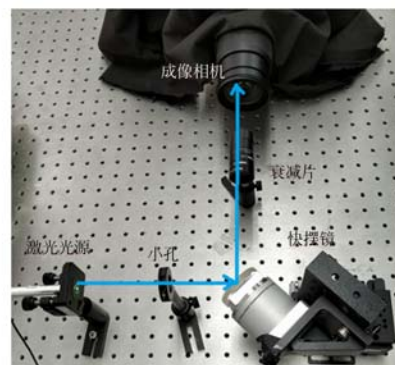


图 10 实验平台

Fig. 10 Experiment platform

表 2 为摆镜在两个不同摆动角速度下本文算法的实验效果。由于摆镜能力有限,星斑漂移速度限制在 120 pixel/s 以内。

表 2 不同星斑漂移速度复原实验结果

Tab. 2 Restoration results in different star drifting speeds

漂移速度/(pixel · s ⁻¹)	方向估计/(°)		长度估计/pixel		复原前信噪比 /dB	复原后信噪比 /dB
	理论值	实际值	理论值	实际值		
60	0.0	4.2	6.0	4.9	17	36.3
	30.0	27.5	6.0	5.3		
	45.0	47.8	6.0	5.7		
	60.0	58.7	6.0	6.9		
120	0.0	2.8	120.	13.4	11	30
	30.0	32.3	12.0	11.1		
	45.0	46.9	12.0	12.8		
	60.0	63.1	12.0	10.7		

星斑漂移速度为 60 pixel/s 时积分时间内星斑漂移 6 pixel, 星斑复原前信噪比为 17 dB, 复原后信噪比为 36.3 dB, 信噪比提高了 2.1 倍。星斑漂移速度为 120 pixel/s 时积分时间内星斑漂移 12 pixel, 星斑复原前信噪比为 11 dB, 复原后信噪比为 30 dB, 信噪比提高了 2.7 倍。星斑漂移速度较大时星斑能量分布更为分散, 所以复原前信噪比较低, 但是本文算法仍可较精确地估计出星斑运动长度及方向, 经过粗、精两步复原, 星斑信噪比得到较大的提升。

由实验结果可知, 模糊星斑运动方向和长度的计算值与理论值差距较小, 实验效果理想。经过精级复原, 星斑收缩到较小窗口区域, 提升了信噪比。模糊星斑复原后信噪比的提升程度略小于

仿真值是因为探测器噪声影响较大。

7 结 论

本文主要贡献有两点:(1)提出了一种基于灰度拉伸的改进 Radon 变换, 其运动模糊参数估计精度至少是传统方法的两倍。(2)利用星斑梯度稀疏先验设计了星斑迭代盲复原算法, 进一步提高了复原后星斑的信噪比和质心定位精度; 较传统方法星斑峰值信噪比(PSNR)提高 30%, 质心定位精度提高 55%。本文算法可以应用于复杂空间环境载体对星斑质心定位精度要求较高的场景下, 这对于需要更高精度姿态数据的空间星光导航系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] KAZEMI L, ENRIGHT J, DZAMBA T. Improving star tracker centroiding performance in dynamic imaging conditions[C]. *Aerospace Conference*, 2015 IEEE. IEEE, 2015: 1-8.
- [2] MA L, WANG X, ZHAN D, *et al.*. Extraction method of the motion blurred star image for the star sensor under high dynamic conditions[C]. *Signal Processing (ICSP)*, 2014 12th International Conference on. IEEE, 2014: 836-840.
- [3] QIAN X, YU H, CHEN S. A Global-shutter centroiding measurement CMOS image sensor with star region SNR improvement for star trackers [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(8): 1555-1562.
- [4] YAN J, JIANG J, ZHANG G. Dynamic imaging model and parameter optimization for a star tracker [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5961-5983.
- [5] SUN T, XING F, YOU Z, *et al.*. Motion-blurred star acquisition method of the star tracker under high dynamic conditions [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20096-20110.
- [6] HOU W, LIU H, LEI Z, *et al.*. Smearing star spot location estimation using directional integral method [J]. *Applied optics*, 2014, 53(10): 2073-2086.
- [7] SUN T, XING F, YOU Z, *et al.*. Smearing model and restoration of star image under conditions of variable angular velocity and long exposure time [J]. *Optics express*, 2014, 22(5): 6009-6024.
- [8] SU L, SHAO X, WANG L, *et al.*. Richardson-

- Lucy deblurring for the star scene under a thinning motion path[C]. *SPIE Sensing Technology Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2015:95010L-95010L-9.
- [9] WANG K, ZHANG C, LI Y, *et al.*. A new restoration algorithm for the smeared image of a SINS-aided star sensor[J]. *The Journal of Navigation*, 2014, 67(5): 881-898.
- [10] SUN H, DESVIGNES M, YAN Y, *et al.*. Motion blur parameters identification from radon transform image gradients[C]. *Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE. IEEE*, 2009; 2098-2103.
- [11] WEI Q, WEINA Z. Restoration of motion-blurred star image based on Wiener filter[C]. *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on. IEEE*, 2011, 2: 691-694.
- [12] XIAO J W, XIN L W. Multiple blur of star image and the restoration under dynamic conditions[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11): 1903-1913.
- [13] FAHMY M F, RAHEEM G M A, Mohamed U S, *et al.*. A new fast iterative blind deconvolution algorithm[J]. *Journal of Signal and Information Processing*, 2012, 3(01): 98.
- [14] XU L, ZHENG S, JIA J. Unnatural l0 sparse representation for natural image deblurring[C]. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2013:1107-1114.

作者简介:



郑天宇(1990—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,2013年毕业于于武汉大学并获得学士学位,主要从事高速图像处理系统的研究。E-mail: coding_ali@163.com

导师简介:



尹达一(1976—),男,河南开封人,博士,研究员,博士生导师,2009年毕业于中国科学院研究生院并获博士学位。现主要从事空间紫外成像和光谱技术、空间光电遥感精密机械和自动控制、空间高精度稳像控制技术信息获取及处理等前沿技术方面研究。E-mail: yin-dayi@mail. sitp. ac. cn