

文章编号:1007-2780(2016)03-0310-07

漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象 快速消除方法研究

柳红岩^{1 *}, 孙慧婷¹, 李 岩², 武晓东³

- (1. 苏州科技学院 电子信息与工程学院, 江苏 苏州 215000;
2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;
3. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215000)

摘要:在漂移扫描天文望远镜 CCD 相机系统中,为了有效去除 CCD 星图中 smear 现象,通过分析其成像机理,提出一种自适应快速 smear 现象消除算法。该算法在背景灰度均匀分布的基础上,通过计算并拟合每列像素灰度平均值,自适应选取最佳阈值,判断并消除 smear 现象。通过对实时同步卫星定轨系统拍摄的大小为 $1\,528 \times 1\,528$ 的星图进行处理,实验结果表明,拖尾被全部去除,背景均值差明显减小,处理时间约为传统的局部直方图高斯拟合 smear 去除算法所耗时间的 20%,验证了该算法的有效性。

关 键 词: smear; 背景拟合; 拖尾消除

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163103.0310

Fast Smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image

LIU Hong-yan^{1 *}, SUN Hui-ting¹, LI Yan², WU Xiao-dong³

- (1. *Electronic and Information Engineering Faculty, Science and Technology University of Suzhou, Suzhou 215000, China;*
2. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;*
3. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China)*

Abstract: To eliminate smear effect of star image taken by CCD drift scan mode, a self-adapting fast smear elimination algorithm is proposed after analyzing image mechanism. On the basis of even gray level distribution of background, smear effect can be removed by calculating and fitting gray mean of pixels in every column and determining adaptive threshold value. After processing star image taken by real-time synchronous satellite positioning system, the size of the star image is $1\,528 \times 1\,528$, the

收稿日期: 2015-04-10; **修订日期:** 2015-06-15.

基金项目: 上海市自然科学基金(No. Y256501001); 江苏省研究生培养创新工程项目(No. KYLX15_1311)

Supported by Natural Science Found of Shanghai City(No. Y256501001); Innovation Project of Jiangsu Province(No. KYLX15_1311)

* 通信联系人, E-mail: 522096420@qq.com

experiment results show that mean deviation of background is apparently reduced and the precision is promoted, the consuming time of the method is only 20% of median filtering and multi-threshold setting method's, which proves validity.

Key words: smear; background fitting; trail elimination

1 引言

利用恒星定位归算卫星轨道是常见的同步卫星定轨方法,但对卫星与恒星同时拍摄时,由于卫星与恒星之间相对运动,所拍摄星图不能同时获得两者圆形形状,所以提出天文望远镜漂移扫描工作方式。漂移扫描天文望远镜的 CCD 相机利用 Time-delay Integration(TDI)工作方式和凝视工作方式交替观测同步卫星与恒星,TDI 工作方式下拍摄的恒星表现为拖尾形状,卫星为圆形形状,凝视工作方式下恒星为圆形形状,卫星为拖尾形状。由于恒星为圆形目标时易提取,所以漂移扫描工作模式更能提高恒星天文定位精度^[1]。在 TDI 工作方式下拍摄星空,当面阵 CCD 进行感光时,等星较亮的恒星的光线照在 CCD 的感光区,感光区持续曝光,CCD 所转化的电荷在短时间内不能全部转移到存储区,致使漏光电荷附加在整列像元上而出现 smear 现象,在星图中表现为一条很亮的拖尾,如图 1 所示。

Smear 现象不利于恒星提取,影响恒星定位精度,滤除 smear 现象从两方面考虑,硬件方面消除 smear 现象可以通过减少曝光时间,使得 CCD 感光区在电荷转移时间内不受曝光,但这样无法拍摄到较暗星等的恒星^[2]。文献[3]提出将帧转移 CCD 换为行转移 CCD,及时存储单个电荷,然后再转移读出^[3],但 CCD 的感光区也同时减小,CCD 的灵敏度随之减小。

从软件方面消除 smear 现象,文献[4]提出利用恒星成像的频域各向同性性质和 Fourier 变换的自配准性质对亮线进行检测,然后通过中值滤波法在空间域修复和内插值方法在频率域修复。这种方法能够去除拖尾现象,但从图像频域方面处理会增加计算冗余。文献[5]提出使用多层二维 Haar 小波分解,把 smear 亮线分离到低频分量及高频垂直分量中分别进行 smear 消除处理。这种方法能够去除拖尾和保留弱小目标,但由于在不同尺度上得到的逼近信号特征之间存在差

异,小波函数难以在不同尺度上准确地逼近局部信号特征,因此降噪预处理时重构信号会丢失原有的时域特征。文献[6]提出利用局部直方图高斯拟合法对背景进行拟合,利用中值滤波与多阈值设定保留星点目标。

上述方法都能去除拖尾,但在实时同步卫星定轨中,需及时处理星图,对恒星快速定位,实现同步卫星实时定轨,利用上述方法难以满足系统实时处理要求。在上述方法的基础上,本文提出一种自适应快速 smear 现象去除方法,即通过对星图背景不均匀性进行处理,计算并拟合每列像素的灰度平均值,自适应确定拖尾位置,将拖尾像素用拟合平均值填充。此算法不需重复计算与判断,计算量较小,能够在保证处理精度的基础上减少耗时,提高 smear 去除效率。

2 星图背景不均匀性处理

天文望远镜在对天空进行拍摄时,由于受到月光或者其他自然现象的影响,星图的背景亮度分布不均匀,如图 1 所示,图 2 为其直方图,从图 2 可看出背景在直方图上没有明显的波峰波谷且不是均匀分布的高斯曲线,这对后续拖尾处理造成很大的影响^[7],需去除这种不均匀性,使得背景直方图中的高斯曲线均匀分布。

针对这种背景不均匀性,利用逐行逐列多项式拟合的方法,拟合多项式为 $F_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$,

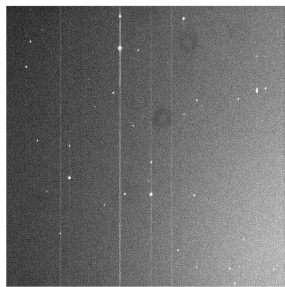


图 1 有 smear 现象的不均匀背景星图示例
Fig. 1 Star image of non-uniform background with smear effect

x 为列数或行数。对于实时同步卫星定位系统拍摄出的星图,多项式取到 3 阶即可得到较准确的拟合多项式^[8]。

通过对 100 幅星图进行处理,比较其标准差,处理前星图背景标准差的均值为 80,处理后的均值为 28,可见,背景的振荡幅度大约减小了原来的 1/3。图 3 为多项式拟合之后的星图,从图 3 可以看出背景亮度分布均匀且比原图偏暗,星点目标像素的灰度值未受多项式拟合影响。图 4 为多项式拟合处理之后星图的灰度直方图,对比图 2 与图 4 可看出背景的不均匀性得到有效的拟合。

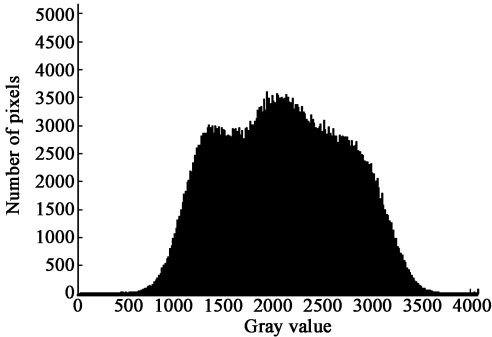


图 2 背景处理前星图的灰度直方图
Fig. 2 Gray histogram of star image before processing

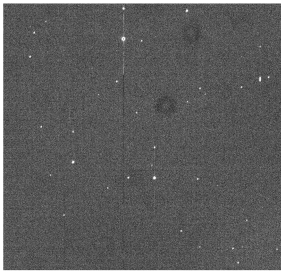


图 3 背景不均匀处理之后的星图
Fig. 3 Star image after background fitting

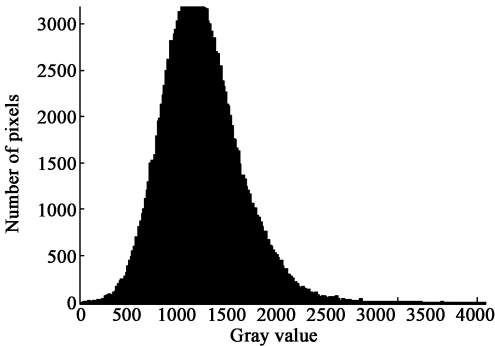


图 4 背景处理后星图的灰度直方图
Fig. 4 Gray histogram of star image after processing

2 自适应快速 smear 现象消除

拖尾的消除大体分为两个步骤,首先确定拖尾出现位置,通过多项式拟合每列的灰度平均值,比较拟合前后灰度平均值判断拖尾位置。然后去除拖尾,通过判断拖尾部分的像素,根据像素的灰度值区分拖尾与目标,去除拖尾像素。

2.1 拖尾位置检测

拖尾列可通过检测灰度梯度确定,即将每列像素的灰度值累加求和,形成灰度梯度变化曲线,此方法需选取合适的阈值判断拖尾列,而对于背景分布不均匀的星图或亮度较弱的拖尾,阈值选取困难,灵活性差。也可通过不断迭代拟合背景直方图的高斯曲线,缩小拖尾列的判断范围,统计范围内的像素的连续分布情况判断拖尾列^[9],此方法算法复杂,无法满足星图快速处理的实时性。为克服上述不足,本文提出利用过多项式拟合法判断拖尾列,不但能够准确检测拖尾,而且能够实现快速检测。

从图 1 可知,拖尾出现在星图的列的方向,计算星图每列像素灰度值的平均值,比较平均值可发现拖尾所在列的灰度平均值远大于无拖尾列的灰度平均值,图 5 为图 1 所示星图中拖尾列及其邻近列的 smear 去除前后列灰度平均值对比曲线,从图 5 可看出拖尾列的灰度平均值在曲线中明显凸出。根据上述特点,可以通过设定阈值检测拖尾出现的位置, $T_h = M + aD$, 其中 M 为所有列灰度平均值的均值, D 为标准差, a 为权值。在星图中,由于目标像素的灰度值大于背景平均值与 3 倍均方差之和,所以在此 a 可取 3 为初值。

列灰度平均值 M_{bef} 的计算公式为: $M_{\text{bef}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}$, 其中, P_n 为每列中第 n 个像素的灰度值,对于图 1 所示的星图,其图像分辨率为 $1\,528 \times 1\,528$,每个像素由 12 位表示,计算所得 T_h 为 2 061.14。比较 M_{bef} 与 T_h ,得出拖尾列总列数为 17,从图 6 可知真正出现 smear 现象的列数为 12,若利用增加阈值,即增加权值 a 的方法检测拖尾列,由于不同的星图,其权值 a 的取值各异,一方面难以衡量 a 的取值,另一方面不能利用固定权值处理所有星图,所以单凭阈值无法准确地确定拖尾出现位置。由于有拖尾列灰度

平均值远大于无拖尾列灰度平均值,根据这一特点,可通过对列灰度平均值进行多项式拟合,比较拟合值和原值判断拖尾出现的位置,列灰度平均值的拟合多项式为:

$$M_{aft} = a_1 + a_2j_n + a_3j_n^2 + a_4j_n^3, \tag{1}$$

其中: M_{aft} 为多项式拟合后的列灰度平均值, a_1, a_2, a_3, a_4 为多项式系数, j_n 为其对应列数,权值 a_1, a_2, a_3, a_4 可利用式(2)计算:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j_1 & j_1^2 & j_1^3 \\ 1 & j_2 & j_2^2 & j_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & j_n & j_n^2 & j_n^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_{bef1} \\ M_{bef2} \\ \dots \\ M_{befn} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

其中: M_{befn} 代表第 n 列多项式拟合前列灰度平均值。

由于拖尾列的列灰度平均值 M_{bef} 异常大于拟合之后的灰度平均值 M_{aft} ,所以若满足 $M_{bef} > M_{aft} + 3\sigma$,则被判断为有拖尾列,反之为无拖尾列,其中, σ 为多项式拟合后列灰度平均值曲线的标准差。图 6 为图 1 所示星图第 900~950 列拟合前后列灰度平均值的对比图, σ 值为 7.647,从图 6 可看出,在此范围内真正出现拖尾的列数为 8。图 5 中实线为利用此方法去除 smear 后列灰度平均值,从图 5 可以看出此方法可以正确检测拖尾列。

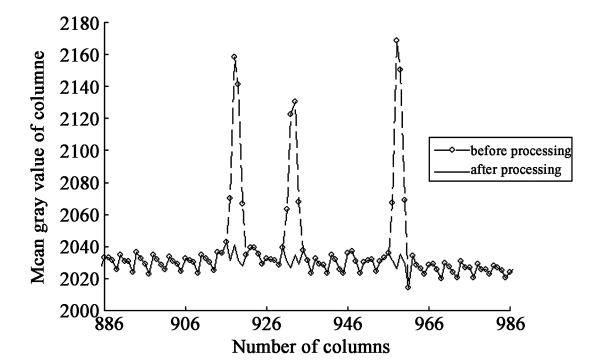


图 5 Smear 去除前后每列像素灰度平均值
Fig. 5 Mean gray value of every column before and after smear eliminating

对于实时同步卫星定位系统凝视模式下拍摄的星图,星图大小为 $1\,528 \times 1\,528$,smear 现象不会贯穿全图,通过统计 5 000 幅星图 smear 现象所在的列数,拖尾只会出现在第 200~1440 列,所以在实验中可以缩小拖尾检测搜索范围,提高搜

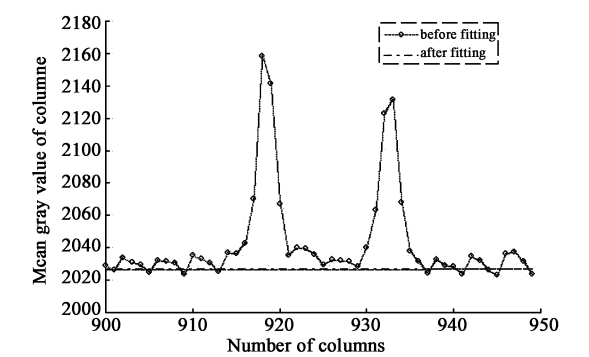


图 6 多项式拟合前后列灰度平均值对比
Fig. 6 Mean gray value of every column before and after fitting

索速度。
2.2 拖尾消除

检测出拖尾后,对拖尾像素进行赋值,去除拖尾。

图 7 显示了拖尾列每个像素的灰度值,从图 7 可以看出,此列中星点目标像素的灰度值明显高于此列的灰度平均值,所以根据拖尾的这种特点可以区分出星点目标像素与拖尾像素。

拖尾像素的赋值公式为:

$$P_{aft} = \begin{cases} M_{aft} + P_{bef} - M_{bef} & P_{bef} > M_{bef} + a\sigma \\ M_{aft} & P_{bef} \leq M_{bef} + a\sigma \end{cases}, \tag{3}$$

其中: P_{aft} 为去除拖尾后像素灰度值, P_{bef} 为去拖尾前的像素灰度值, σ 为列像素灰度均方差,由于星点目标像素的灰度值要明显大于此列灰度平均值,所以权值 a 应取 10。从图 5 中 smear 去除后的列灰度平均值可看出拖尾不但被有效去除,而且列灰度平均值分布均匀。

拖尾像素赋值前,不需要利用连通域法判断弱小目标^[10],因为对于实时同步卫星定位系统,10 颗恒星即可归算同步卫星地球坐标,30 颗恒星即可满足归算精度,星图中的恒星数量远远大于 30,而拖尾中的弱小目标很少,所以不需进一步处理拖尾中的弱小目标。对拖尾像素直接赋值可以减少计算量,保证快速去除 smear。

3 实验结果

为了验证算法的有效性,利用本文所提出的快速 smear 去除算法与文献[6]提出的局部直方

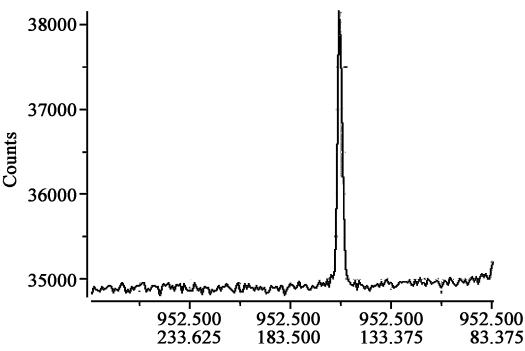


图 7 拖尾列像素灰度值

Fig. 7 Gray value of every pixel in trailing smear

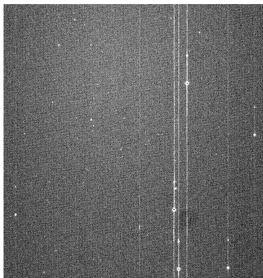


图 8 漂移扫描 CCD 拍摄的有 smear 现象的星图

Fig. 8 Star image with smear taken by drift scan CCD

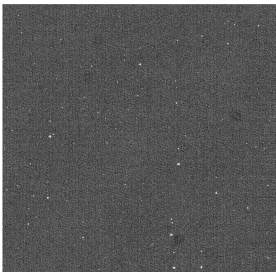


图 9 快速 smear 去除算法处理后的星图

Fig. 9 Star image of rapid smear elimination method

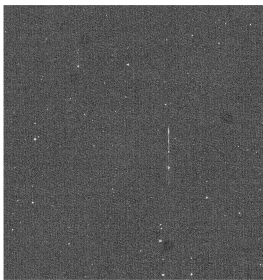


图 10 局部直方图高斯拟合 smear 去除算法处理后星图

Fig. 10 Star imageafter processing with Gauss fitting of region gray histogram

图高斯拟合方法同时对漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象进行处理,例如处理图 8 所示星图,漂移扫描 CCD 星图是由视场角为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的天文望远镜所拍摄,星图分辨率为 $1\,528 \times 1\,528$,星图的灰度为 12 bit,软件的开发平台为 Microsoft Visual C++ 6.0,运行环境为 Win 7,硬件配置为 Intel Core i7,4 GB 内存,两种方法的处理结果分别如图 9 与图 10 所示,从图 9 可看出快速 smear 去除算法可以完全去除 smear 现象,而文献[6]所提出的 smear 去除算法处理结果出现拖尾残留,拖尾去除后的星图局部放大图见图 11,拖尾去除后的星图的直方图见图 12。从图 11 与图 12 可看出,拖尾不但得到有效的去除,目标得到保留,而且星图背景均匀分布。

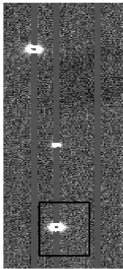


图 11 smear 去除后的星图局部放大图

Fig. 11 Region enlarged star image after processing

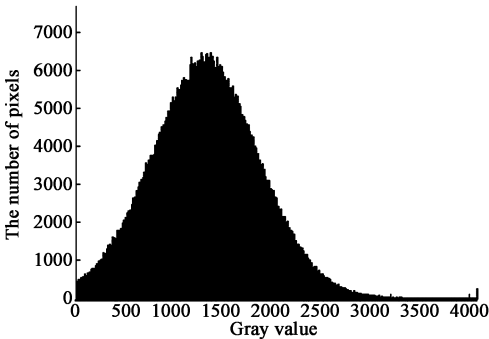


图 12 smear 去除后星图的直方图

Fig. 12 Gray histogram of star imageafter processing

在处理时间方面,利用两种 smear 去除算法对 100 幅相同条件下漂移扫描 CCD 拍摄的星图进行处理,比较其平均处理时间,此算法的平均耗时约为 0.10 s,而文献[6]提出的处理方法平均耗时为 0.572 s,由此可见本文提出的算法不仅能有效去除 smear 现象,而且耗时较少,满足同步卫星实时定轨系统在时间上的要求。

由于在星图背景不均性处理过程中,对星图进行逐列多项式拟合时,有时会拟合掉拖尾的某一部分,不利于后续对拖尾的检测,所以在实际应用中程序的流程为:先对星图进行逐行的多项式拟合,再去拖尾,最后对星图进行逐列的多项式拟合。

利用均值差来评价 smear 区域拖尾去除好坏^[11],均值差计算方法为 smear 区域的灰度平均值与其局部背景灰度平均值之差,均值差越小表明去除的效果越好,均值差计算公式为:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n P(x,y) - \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N P(x,y), \tag{4}$$

其中, $m \times n$ 为局部区域中 smear 的面积, $M \times N$ 为局部区域面积, $P(x,y)$ 为局部区域中坐标为 (x,y) 处像素的灰度值。

例如对图 11 所示方框中的区域进行评价,所得结果如表 1 所示,从表 1 可以看出处理后的均值

差远小于处理前的均值差,可见,该算法能够有效去除漂移扫描 CCD 星图的拖尾。

表 1 消除 smear 效应均方差对比

Tab. 1 unbiased variance contrast of smear elimination

	before processing	after processing
unbiased variance	54	3

4 结 论

本文通过分析漂移扫描 CCD 星图中 smear 效应的特点,提出自适应快速 smear 现象去除算法,先对星图背景进行多项式拟合,去除背景的不均匀性,然后计算图像每列像素灰度平均值,确定拖尾的位置,对拖尾像素进行赋值,去除拖尾。实验表明,此算法不仅能够准确快速地判断拖尾位置并消除拖尾,而且其处理时间约为常规 smear 去除算法所用时间的 20%,满足天文观测的稳定,可靠,快速的要求。

参 考 文 献:

[1] 毛银盾,唐正宏,陶隽,等. 漂移扫描 CCD 用于地球同步轨道卫星观测的初步结果[J]. 天文学报,2007,48(4): 475-487.
MAO Y D, TANG Z H, TAO J, *et al.* Preliminary results of GSS' optical observation with CCD drift-scan mode [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2007, 48(4): 475-487. (in Chinese)

[2] 关澈,王延杰. CCD 相机实时自动调光系统[J]. 光学精密工程,2008,16(2):358-366.
GUANC, WANG Y J. Real-time auto light control system of CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 358-366. (in Chinese)

[3] DORRINGTON A A, CREE M J, CARNEGIE D A. The importance of CCD readout smear in heterodyne imaging phase detection applications[C]. Image and Vision Computing, New Zealand: IVCNZ, 2005: 233-238.

[4] 常兴华,江桥,师鹏宇. 星图中亮线的自动检测算法[J]. 光电技术应用,2009,24(4):41-43,63.
CHANGX H, JIANG Q, SHI P Y. Automatic detection algorithm of bright line in star-sky image [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(4): 41-43, 63. (in Chinese)

[5] 姚睿,张艳宁,孙瑾秋,等. 星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法[J]. 光子学报,2011,40(3): 413-418.
YAOR, ZHANG Y N, SUN J Q, *et al.* Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star-sky image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 413-418. (in Chinese)

[6] 韩艳丽,刘峰,张健,等. 天文观测星图中亮线的去除方法[J]. 光电工程,2013,40(8):47-51,58.
HAN Y L, LIU F, ZHANG J, *et al.* Bright line removal algorithm of star-sky image in astronomic observation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(8): 47-51, 58. (in Chinese)

[7] 程培英,沈会良. 一种光照不均匀图像的恢复增强方法[J]. 计算机应用与软件,2008,25(10):52-54,62.
CHENG P Y, SHEN H L. Recovery and enhancement method for images acquired under non-uniform lighting [J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 25(10): 52-54, 62. (in Chinese)

[8] 于涌,李岩,毛银盾,等. 空间碎片激光测距与光学测角一体化观测试验[J]. 天文研究与技术,2013,10(4):359-364.

YU Y, LI Y, MAO Y D, *et al.* Experimental observations of space debris integrating laser ranging and optical direction measurement [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2013, 10(4): 359-364. (in Chinese)

[9] 贺磊,张平,刘效东,等.小视场轻型星敏传感器在白天测星中的应用[J].应用光学,2014,35(2):226-229.

HE L, ZHANG P, LIU X D, *et al.* Application of light star sensor with small field in stellar measurement during daytime [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 226-229. (in Chinese)

[10] 孙瑾秋,周军,朱宇,等.天文观测 CCD 相机中 smear 效应的消除[J].光学精密工程,2011,19(10):2526-2532.

SUN J Q, ZHOU J, ZHU Y, *et al.* Smear removal of CCD camera in astronomic observation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2526-2532. (in Chinese)

[11] 张健,任建存,张春华.星空观测图像目标拖尾的自动消除[J].应用光学,2013,34(1):62-67.

ZHANG J, REN J C, ZHANG C H. Automatic de-smearing algorithm for target in space observation image [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 62-67. (in Chinese)

作者简介:柳红岩(1990—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:522096420@qq.com

孙慧婷(1992—),女,江苏东台人,硕士研究生,主要从事光电测控技术方面的研究。E-mail:935898831@qq.com