

近红外偏振探测器校正方法

黄飞^{1,2,3}, 李范鸣^{1,3}, 王世勇^{1,3}, 陈超帅^{1,2,3}, 石永彪^{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. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 近红外偏振探测器是近年来一种新的探测器结构, 它将光栅附在了焦平面探测器的表面. 为了解决光栅透射率和角度不均匀对线偏振度测量的影响, 采用了一种新的线偏振度求解方法. 该方法对光栅透射率和光栅角度进行了校正, 消除了光栅透射率和光栅角度不均匀性对线偏振度测量的影响, 理论上表明了红外偏振成像质量与光栅透射率和光栅角度无关. 实验结果显示, 在使用黑体作为标定光源和不考虑偏振像元之间串扰的情况下, 采用原有的计算方法得到的结果是真实值的 14%~24%, 透射率校正后的结果是真实值的 80%~120%, 透射率和角度校正后的结果是真实值的 96%~104%.

关键词: 红外偏振; 透射率校正; 角度校正; 线偏振度

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Calibration method for NIR polarization detector

HUANG Fei^{1,2,3}, LI Fan-Ming^{1,3}, WANG Shi-Yong^{1,3}, CHEN Chao-Shuai^{1,2,3}, SHI Yong-Biao^{1,2,3}

(1. key Laboratory of infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 20083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China;

3. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, a new NIR polarization detector is presented. It is fabricated out of a wire grid polarizer attaching to the surface of a FPA. A brand new method solving linear polarization is proposed at the same time. The transmittance and the angle of the wire grid are corrected. The effect on the degree of linear polarization (DoLP) measurement is also eliminated in this report. Theoretically, the infrared polarized image quality is independent of the transmittance and angle of wire grid. The experiment uses a blackbody source as the calibration light. The results show that, while ignoring the crosstalk between the polarized pixels, the measured value is about 14%~24% of the true value. After adding the transmittance correction, the data reaches the level of 80%~120% while it becomes 96% to 104% by applying the angle correction.

Key words: Infrared polarization, transmittance correction, angle correction, DoLP

PACS: 07.57.Kp

引言

目前的红外探测器因其得到的信息相对单一, 存在红外信息不足的缺点. 红外目标的辐射除了强度信息外, 还具有诸多的特征信息, 如光谱、相位等,

偏振就是基于相位的重要特性. 引进红外辐射的偏振特性, 便从根本上改变了红外检测系统在目标探测时对辐射强度的依赖^[1-2].

针对当前近红外偏振焦平面探测器^[3-5]的特点, 结合国内外微偏振片的加工技术, 分析了光栅透射

收稿日期: 2017-10-09, 修回日期: 2017-12-18

Received date: 2017-10-09, revised date: 2017-12-18

基金项目: 国家十三五国防预研项目(Jzx2016-0404/Y72-2); 上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2017xewzk08)

Foundation items: National Thirteen Five national defense research Foundation(Jzx2016-0404/Y72-2); Key Laboratory of Shanghai Field Physical Evidence funded Foundation(2017XCW2K08).

作者简介(Biography): 黄飞(1989-), 男, 博士生, 主要从事图像处理方面的研究工作. E-mail: hfkllzj@163.com

率^[6], 光栅角度对偏振测量的影响. 给出了光栅透射率, 光栅角度的测量方法. 由于受实验室测量设备的限制, 标定的参数有一定误差, 参考文献 [7] 给出了准确的测量方法.

1 线列近红外偏振探测器结构

由于受国内制造工艺的限制, 面阵红外偏振探测器制造困难, 实验室采用了 4×270 像元线列近红外偏振探测器 ($0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$). 该线列探测器如图 1 所示. 第一列和第四列为红外像元, 第二列和第三列为偏振像元, 第一行从左到右分别为红外像元, 0° 光栅像元, 135° 光栅像元, 红外像元. 第二行从左到右分别为红外像元, 45° 光栅像元, 90° 光栅像元, 红外像元. 受工艺的限制, 每一个角度的光栅并没完全覆盖红外像元, 光栅与红外像元对应的面积之比为 $0.87:1$, 因此光透过偏振片因光衍射效应对周边像元的串扰^[8]减小, 在本实验中忽略像元间的串扰对偏振度计算的影响.

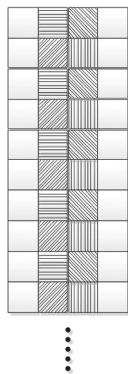


图 1 探测器结构
Fig. 1 Structure of the detector

2 偏振光的表示方法

传统的偏振光使用斯托克斯矢量^[9] $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 表示, 定义如下:

$$\begin{aligned} S_0 &= E_x^2 + E_y^2 \\ S_1 &= E_x^2 - E_y^2 \\ S_2 &= 2E_x E_y \cos \Delta\varphi \\ S_3 &= 2E_x E_y \sin \Delta\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

其中, S_0 表示光波的总强度, S_1 表示平行方向与垂直方向的线偏振光的强度差, S_2 表示 $+\frac{\pi}{4}$ 方向与 $-\frac{\pi}{4}$ 方向的线偏振光的强度差, S_3 表示右旋圆偏振

分量与左旋圆偏振分量之差. 偏振度由斯托克斯是矢量表示可为 $p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$, 即为偏振光强度与总光强之比. 由于圆偏振光分量与线偏振光相比很小, 在实际测量情况下可以忽略. 于是, 偏振度可以表示为 $p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$, 在实际用线偏振片测量中, 在与参考方向成 θ 角度上的光强为

$$I(\theta) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) \quad (2)$$

θ 分别取 0° , 45° , 90° 和 135° 可以得到:

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{1}{2}[I(0) + I(45) + I(90) + I(135)] \\ S_1 &= I(0) - I(90) \\ S_2 &= I(45) - I(135) \end{aligned} \quad (3)$$

然而上述方法并没有考虑光栅透射率和光栅角度不均匀性对偏振计算的影响. 在实际偏振探测器测量中, 光栅透射率并不理想, 其中最大透射率并不为 1, 即红外辐射中振动方向与光栅方向垂直的光矢量分量垂直入射到光栅上时的并没有完全透过, 最小透射率并不为 0, 即红外辐射中振动方向与光栅方向平行的光矢量分量垂直入射到光栅上时的并没有完全不透, 并且四个光栅角度不准确, 上述公式并不适用. 而参考文献 [10] 中采用平均分析矩阵的方法, 计算结果不准确, 为了获取准确的偏振信息, 提出了一种新的表示方法和求解方法, 其中偏振光入射偏振片的模型如式 (4) 所示, k_1 为最大透射率, k_2 为最小透射率, θ 为入射偏振光与偏振片的夹角, I 为入射光强, DoLP 为线偏振度, θ_1 为偏振片方向与参考方向的夹角, I_c 为偏振光透过偏振片的强度.

$$\begin{aligned} I_c &= 0.5(k_1 + k_2)(1 - \text{DoLP})I + \\ &I \times \text{DoLP}(k_1 \sin^2(\theta_1 - \theta) + k_2 \cos^2(\theta_1 - \theta)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $0.5(k_1 + k_2)(1 - \text{DoLP})I$ 为入射光强中无偏振光透过偏振片的光强, $I \times \text{DoLP}(k_1 \sin^2(\theta_1 - \theta) + k_2 \cos^2(\theta_1 - \theta))$ 为入射光强中偏振光透过偏振片的强度. 由上述可得, 求出未知的入射光强, 偏振度和偏振角度, 只需要三个不同角度偏振信息, 在本文计算中, 采用了四个角度计算.

3 透射率校正与角度校正实验

3.1 最大透射率和最小透射率对偏振计算的影响

为了标定最大透射率和最小透射率, 设计了图 2 测量装置: 高温黑体产生的光透过带有电机的偏

振片,再经过没有光学镜头的探测器,其中偏振片消光比为 1 000: 1. 电机每转 2 度采集一个数据.



图 2 测量装置
Fig.2 Measuring device

经过探测器响应非均匀性校正^[11]后,可以得到四个通道的响应图 3:

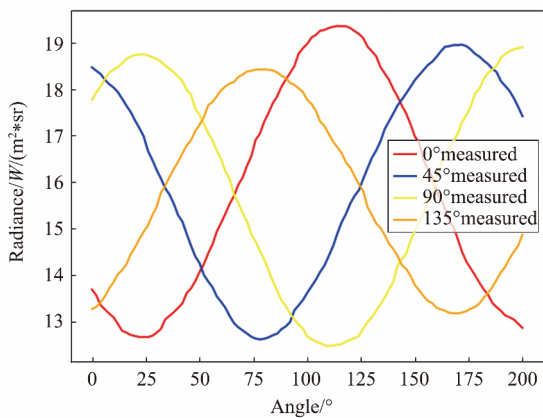


图 3 四通道响应图
Fig.3 Four channel response graph

按照公式(3)计算偏振度,结果如图 4 所示,其中 DoLP 理论值为 99.8%,可见采用原始计算方法与实际值差异较大,而且呈现出有规则的上下波动,均值误差较大主要原因是在于实测四个微偏振片的最大透射率均值为 0.91,最小透射率均值为 0.6,消光比仅为 1.52($\frac{k_1}{k_2}$),与理想偏振片消光比差异较大,此时计算出的偏振度应该约是真实偏振度的 $0.20(\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2})$ ^[12],与图中显示的结果相符合.

最大透射率,最小透射率和角度可以通过公式(4)进行拟合原有的测量曲线得出,结果如图 5 所示,其中可以明显得看出四个像元接收到光强的最大值和最小值都不一样,可见最大和最小透射率存在较大的不均匀性.

获得四个像元的透射率之后,可以根据公式(4),即可列出四个方程(5),其中设入射光强为 I ,

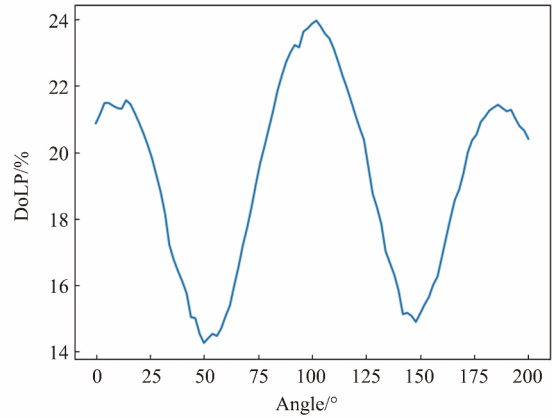


图 4 校正前偏振度随角度变换图
Fig.4 The degree of polarization varies with angle before correction

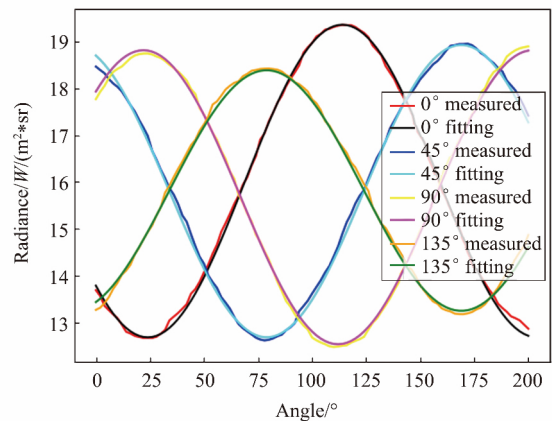


图 5 探测器响应拟合曲线
Fig.5 The detector responds to the fitting curve

线偏振度为 DoLP,入射偏振光与偏振片的夹角为 θ ,0 度光栅像元的最大透射率为 k_1 ,最小透射率为 k_2 ,透过光强为 I_0 ,45 度光栅像元的最大透射率为 k_3 ,最小透射率为 k_4 ,透过光强为 I_{45} ,90 度光栅像元的最大透射率为 k_5 ,最小透射率为 k_6 ,透过光强为 I_{90} ,135 度光栅像元的最大透射率为 k_7 ,最小透射率为 k_8 ,透过光强为 I_{135} ,计算结果如下:

$$\begin{cases} I_0 = 0.5(k_1 + k_2)(1 - \text{DoLP})I + I \times \text{DoLP}(k_1 \sin^2 \theta + k_2 \cos^2 \theta) \\ I_{45} = 0.5(k_3 + k_4)(1 - \text{DoLP})I + I \times \text{DoLP}(k_3 \sin^2(45 - \theta) + k_4 \cos^2(45 - \theta)) \\ I_{90} = 0.5(k_5 + k_6)(1 - \text{DoLP})I + I \times \text{DoLP}(k_5 \sin^2(90 - \theta) + k_6 \cos^2(90 - \theta)) \\ I_{135} = 0.5(k_7 + k_8)(1 - \text{DoLP})I + I \times \text{DoLP}(k_7 \sin^2(135 - \theta) + k_8 \cos^2(135 - \theta)) \end{cases} \quad (5)$$

令:

$$\begin{aligned} a &= (I_{90}k_2 - I_0k_5) / (I_0k_5 + I_0k_6 - I_{90}k_1 - I_{90}k_2) \\ b &= (I_{90}k_1 - I_0k_6) / (I_0k_5 + I_0k_6 - I_{90}k_1 - I_{90}k_2) \\ c &= (I_{45}k_7 - I_{135}k_4) / (I_{135}k_3 + I_{135}k_4 - I_{45}k_7 - I_{45}k_8) \\ d &= (I_{45}k_8 - I_{135}k_3) / (I_{135}k_3 + I_{135}k_4 - I_{45}k_7 - I_{45}k_8) \\ e &= I_0k_5 + I_0k_6 - I_{90}k_1 - I_{90}k_2 \\ f &= I_{90}k_2 - I_0k_5 \\ g &= I_{90}k_1 - I_0k_6 \end{aligned}$$

则解方程可得:

$$\begin{aligned} \tan\theta &= (d - c \pm \sqrt{2 - 4ab - 4cd}) / (c + d - 2b) \\ \text{DoLP} &= e(1 + \tan^2\theta) / (2f + e + (2g + e)\tan^2\theta) \end{aligned}$$

可以得到透射率校正后的偏振度随着偏振片角度变化的探测器响应图 6, 可以看出做完透射率校正后偏振度是真实值的 80% ~ 120%, 其均值已经接近理论值, 但呈现出有规则的上下波动。

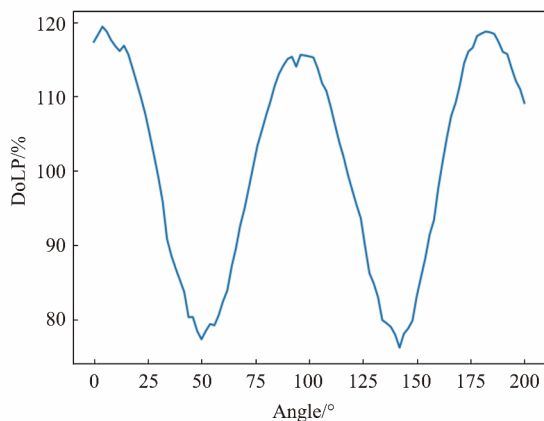


图 6 透射率校正后偏振度随角度变换图

Fig. 6 The degree of polarization varies with angle after transmittance calibration

3.2 光栅角度对偏振计算的影响

由于制造工艺的限制, 在实际测量中发现 0° , 45° , 90° 和 135° 光栅与参考方向的夹角并不准确, 大约有 1° 到 2° 的误差, 导致了图 4 和图 6 有规律的上下波动. 于是在原有测量结果的基础上标定了角度.

在方程(5)的基础上, 设 0° 光栅与参考方向的夹角为 θ_0 , 透射光强为 I_0 , 45° 光栅与参考方向的夹角为 θ_1 , 透射光强为 I_1 , 90° 光栅与参考方向的夹角为 θ_2 , 透射光强为 I_2 , 135° 光栅与参考方向的夹角为 θ_3 , 透射光强为 I_3 , 可以得到如下方程:

$$\begin{cases} I_0 = 0.5(k_1 + k_2)(1 - \text{DoLP})I + \\ \quad I \times \text{DoLP}(k_1 \sin^2(\theta_0 + \theta) + k_2 \cos^2(\theta_0 - \theta)) \\ I_1 = 0.5(k_3 + k_4)(1 - \text{DoLP})I + \\ \quad I \times \text{DoLP}(k_3 \sin^2(\theta_1 - \theta) + k_4 \cos^2(\theta_2 - \theta)) \\ I_2 = 0.5(k_5 + k_6)(1 - \text{DoLP})I + \\ \quad I \times \text{DoLP}(k_5 \sin^2(\theta_2 - \theta) + k_6 \cos^2(\theta_2 - \theta)) \\ I_3 = 0.5(k_7 + k_8)(1 - \text{DoLP})I + \\ \quad I \times \text{DoLP}(k_7 \sin^2(\theta_3 - \theta) + k_8 \cos^2(\theta_3 - \theta)) \end{cases}, \quad (6)$$

令:

$$\begin{aligned} a &= 2I_0k_5 / (k_1I_2 + k_2I_2 - k_5I_0 - k_6I_0) \\ b &= 2I_0k_6 / (k_1I_2 + k_2I_2 - k_5I_0 - k_6I_0) \\ c &= 2I_2k_1 / (k_5I_0 + k_6I_0 - k_1I_2 - k_2I_2) \\ d &= 2I_2k_2 / (k_5I_0 + k_6I_0 - k_1I_2 - k_2I_2) \\ e &= 2I_1k_7 / (k_3I_3 + k_4I_3 - k_7I_1 - k_8I_1) \\ f &= 2I_1k_8 / (k_3I_3 + k_4I_3 - k_7I_1 - k_8I_1) \\ g &= 2I_3k_3 / (k_7I_1 + k_8I_1 - k_3I_3 - k_4I_3) \\ h &= 2I_3k_4 / (k_7I_1 + k_8I_1 - k_3I_3 - k_4I_3) \\ z_1 &= a\cos^2\theta_2 + b\sin^2\theta_2 + c\cos^2\theta_0 + d\sin^2\theta_0 - e\cos^2\theta_3 \\ &\quad - f\sin^2\theta_3 - g\cos^2\theta_1 - h\cos^2\theta_1 \\ z_2 &= a\cos^2\theta_2 + b\sin^2\theta_2 + c\cos^2\theta_0 + d\sin^2\theta_0 - e\cos^2\theta_3 \\ &\quad - f\sin^2\theta_3 - g\cos^2\theta_1 - h\cos^2\theta_1 \\ z_3 &= (a - b)\sin 2\theta_2 + (c - d)\sin 2\theta_0 + (f - e)\sin 2\theta_3 \\ &\quad + (h - g)\sin 2\theta_1 \end{aligned}$$

则:

$$\tan\theta = (-z_3 \pm \sqrt{z_3^2 - 4z_1z_2}) / (2z_2)$$

$$\begin{aligned} \text{DoLP} &= 1 / (1 + a\cos^2(\theta_2 - \arctan(\tan\theta)) + b\sin^2(\theta_2 \\ &\quad - \arctan(\tan\theta)) + c\cos^2(\theta_0 - \arctan(\tan\theta)) + \\ &\quad d\sin^2(\theta_0 - \arctan(\tan\theta))) \end{aligned}$$

可以得到透射率和角度校正后的偏振度随着偏振片角度变化的探测器响应图 7, 可以看出校正后偏振度是真实值的 96% ~ 104%, 已经接近理论值, 上下波动也呈现出随机性.

与原始计算结果和只做透射率标定结果对比如图 8 所示, 透射率校正后纠正了原始计算结果偏振度均值的误差, 但两者因为角度没有纠正都体现了相同规律的上下波动, 可以看出做完透射率和角度校正后更贴近真实值.

4 结论

根据近红外偏振探测器特点, 分析了国内外微偏振片加工的不足, 提出了一种新的偏振度求解方

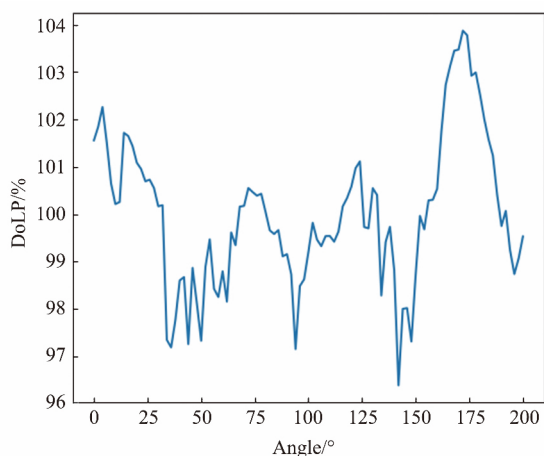


图7 透射率和角度校正后偏振度随角度变换图

Fig. 7 The degree of polarization varies with angle after transmittance and angle calibration

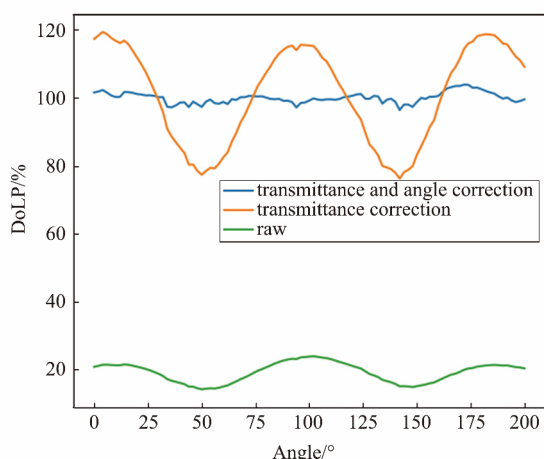


图8 偏振度随角度变换图

Fig. 8 The degree of polarization varies with angle

法 搭建了光栅透射率与光栅角度标定的实验系统. 使用高温黑体和可以旋转的偏振片, 标定了每个光栅的最大透射率, 最小透射率和与角度. 标定结果表明光栅透射率测量值与理论值有较大的偏差, 角度也有一定的偏差, 影响了偏振计算准确性. 随后对标定前后的结果进行了对比, 透射率标定修正了偏振度均值的误差, 角度标定修正了偏振度有规则上下浮动的误差, 表明了该方法可以消除光栅透射率和角度不均匀性对偏振度计算的影响, 更能体现目标

原有的偏振度信息, 对以后的偏振成像有较大帮助.

References

- [1] Playle N, Port D M, Rutherford R, *et al.* Infrared polarization sensor for forward-looking mine detection [C]. *Aero-sense*. 2002: 11-18.
- [2] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared [J]. 2007.
- [3] WANG Xi, CHEN Yang, HU Xiao-Yan, *et al.* Fabrication and signal-to-noise ratio analysis of an integrated polarization focal plane detector for near-infrared light [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (王玺, 陈扬, 胡小燕, 等. 集成偏振近红外焦平面探测器研制与信噪比分析. 光电子 • 激光), 2017(3): 250-255.
- [4] Malone N R. Detection comparisons between LWIR and MWIR polarimetric sensors [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, **6972**: 69720P-69720P-9.
- [5] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5453-69.
- [6] LIAO Yan-Biao. *Polarization optics* [M]. Beijing: Science Press (廖延彪. 偏振光学. 北京: 科学出版社), 2003: 58.
- [7] Baker G, Wilson M, Coulter P. Development and results of NIR polarization camera [C]// Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2007: 89-93.
- [8] Jones M W, Persons C M. Performance predictions for micro-polarizer array imaging polarimeters [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, **6682**: 668208-668208-11.
- [9] Azzam R M A, Elminyawi I M, Elsaba A M. General analysis and optimization of the four-detector photopolarimeter [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, **5**(5): 681-689.
- [10] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [11] WEI Xue-Tong, CAI Ying-Bo, Li De-Biao *et al.* Research on Image Processing in InGaAs Near-infrared Camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* (魏学通, 蔡迎波, 李德彪, 等. InGaAs 近红外图像非均匀性处理研究. 光学与光电技术) 2011 **9**(04): 31-34.
- [12] ZHANG Hai-Yang, ZHANG Jun-Qiang, Yang Bin, *et al.* Calibration for Polarization Remote Sensing System with Focal Plane Divided by Multi-Linear Array [J/OL]. *Acta Optica Sinica* (张海洋, 张军强, 杨斌, 等. 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定. 光学学报), 2016, **36**(11): 318-325.
- [13] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [14] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [15] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [16] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [17] Candès E J, Li X D, Ma Y, *et al.* Robust principal component analysis [J]. *Journal of the ACM*, 2011, **58**(3): 1-37.
- [18] Zhang Z D, Ganesh A, Liang X, *et al.* TILT: transform invariant low-rank textures [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, **99**(1): 1-24.
- [19] YANG Yu-Zhou. Research of Scanning Imaging Method with Focal Plane Array on the Base of Digital TDI Technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (杨育周, 基于数字 TDI 技术的面阵扫描信息获取方式研究, 北京: 中国科学院大学) 2014.

(上接第 301 页)