

文章编号:1007-2780(2019)05-0508-07

分时型长波红外高帧频偏振成像实验研究

张 哲^{1,2}, 刘欣悦^{1,2}, 王建立^{1*}, 姚凯男^{1,2}, 李天赐^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:为了弥补传统分时型长波红外偏振成像系统不能实时探测的不足, 本文通过采用超高速高定位精度旋转轮, 在分时型红外偏振成像装置的基础上, 实现了准实时动态高温目标偏振度图像的探测。采用超高速高定位精度旋转轮, 快速带动偏振片旋转, 改变了目标信息的偏振态, 红外相机同步采集图像数据, 每 4 幅不同角度的光强图, 解算出偏振度图, 循环此过程, 得到运动目标偏振度视频数据, 使装置能够实现运动物体的偏振探测。利用软件控制整个装置成像过程, 由于实验所用红外相机帧频的限制, 所以整个装置实现了 15 帧/s 的目标偏振度探测, 得出目标偏振度变化曲线, 以及强度图与偏振度图的融合结果。本文研究的基于高速旋转轮的分时型长波红外偏振成像, 在具有传统装置优点的基础上, 可以实现探测 15 帧/s 的动态高温运动目标的偏振度图像。该装置在未来的火场救援、燃烧诊断和高温目标的精细成像等领域, 具备潜在应用价值。

关 键 词:长波红外偏振; 运动目标; 偏振探测

中图分类号:O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193405.0508

Division-of-time long-wave infrared high frame frequency polarization imaging experiment

ZHANG Zhe^{1,2}, LIU Xin-yue^{1,2}, WANG Jian-li^{1*}, YAO Kai-nan^{1,2}, LI Tian-ci^{1,2}(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to make up for the shortcomings of the traditional division-of-time long-wave infrared polarization imaging system, image detection of the real-time dynamic high-temperature target polarization degree can be realized by using the ultra-high-speed and high-position precision rotating wheel on the basis of division-of-time infrared polarization imaging device. Using ultra-high speed and high positioning precision rotating wheel, the polarizing plate is rotated rapidly, the polarization state of the target information is changed, the infrared camera synchronously collects image data, and the intensity map is calculated for each of four different angles, and the polarization degree map is calculated and cycled. The moving target polarization degree video data is obtained, so that the device can realize polarization detection of the moving object. Using software to control the imaging process of the whole device, due to the limitation of the frame rate of the infrared camera used in the experiment, the whole device realized the target polarization degree detection of 15 frames/s, and obtained

收稿日期:2018-10-09; 修订日期:2018-12-12.

* 通信联系人, E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

the target polarization degree curve, as well as the result of the fusion of the intensity map and the polarization degree map. The division-of-time long-wave infrared polarization imaging based on high-speed rotating wheel in this paper can realize the polarization degree image of dynamic high-temperature moving target of 15 frames/s based on the advantages of traditional devices. The device has potential application value in the fields of future fire rescue, combustion diagnosis and fine imaging of high temperature targets.

Key words: long-wave infrared polarization; moving target; polarization detection

1 引言

作为电磁辐射的一种,红外辐射存在于周围各事物中,其包含了偏振特性、辐射强度等重要信息。目前,红外成像技术已广泛应用于国防、商业等多个领域。其中在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的长波波段,属于地物(包括人造物)的发射波谱,在昼夜战场侦察、人脸识别、高温目标识别等方面有重要意义。但由于长波红外成像技术仅利用了辐射强度信息,而长波红外偏振成像技术既可以探测到目标与背景的辐射强度,又可以探测到代表目标景物特性的偏振信息^[1-2],由于不同类型的目标具有不同的偏振特性,所以可实现在复杂地物背景下,弱化背景噪声,提高探测与识别能力。因此国内外对此做了很多相关的实验研究,近几十年在我国也逐步受到重视^[3-5]。

早在20世纪,国外就已开始了从可见光波段偏振成像到红外偏振成像技术的研究。在国外,2001年,Forssell等开始进行长波范围的地雷探测;2002年,Tan等人对空间物体进行长波波段的识别研究;2006年,Tyo等人发现利用长波红外偏振探测技术可以识别出杂乱背景中的车辆。至今,国外的长波红外偏振成像技术一直走在前沿。在国内,虽然起步较晚,但以安徽光机所及西北工业大学等为代表,已利用长波热红外偏振成像探测系统,对自然背景和伪装目标进行了相关偏振成像研究^[6-7];其中,北京理工大学王霞等人对高温目标进行陆地探测,并发现长波波段对高温目标偏振成像的优势^[8]。

红外偏振成像系统可分为4种类型,有体积较大的分振幅型偏振成像系统;还有体积小,但是离轴系统,光学设计复杂的分孔径型偏振成像系统;以及将微偏振元器件集成到探测器像素上但会牺牲空间分辨率的分焦平面型偏振成像系统。

本文选取的是装置结构最简单紧凑、数据容易处理、精度较高以及成本较低的分时型长波红外偏振成像系统,但该系统无法实现在同一时刻对目标成像,所以不利于运动目标的探测^[9-14]。

为了解决分时型结构实时性较差的问题,本文基于红外偏振探测原理,在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的长波红外波段,采用超高速高定位精度旋转轮,搭建了分时型长波红外高帧频偏振成像装置,在实验室环境下进行高温目标动态探测实验。对系统完成选型、搭建,得到目标的实时偏振度视频数据,并可同时显示出目标的红外热视频,实现对比结果。实验结果表明,分时型成像装置可以实现动态目标的准实时偏振探测,并体现出长波红外偏振成像独特的优势与特点。

2 基本原理

2.1 Stokes 公式

依据电磁学理论,光波属于横波,因此会出现偏振现象。偏振光的描述方式主要为两种,琼斯矢量和斯托克斯矢量。其中斯托克斯矢量利用4个光强度的时间平均值来表示偏振光,可直接被探测测量,表示为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{RCP} + I_{LCP} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: s_0 表示入射光强, s_1 为水平方向的线偏振分量, s_2 为 45° 方向的线偏振分量, s_3 与圆偏振有关。

此外,偏振度 $K_{\text{DOLP}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}$; 偏振角 $K_{\text{AOLP}} =$

$\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_2}{s_1}\right)$ 。长波红外偏振成像过程如图1所示。

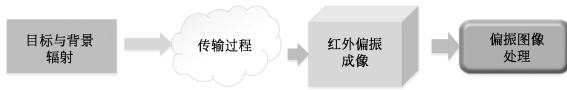


图 1 长波红外偏振成像过程图

Fig. 1 Imaging process diagram of long wave infrared polarization

2.2 测量原理

为了描述出射光的偏振态变化,在光的传输过程中,用 4×4 的米勒矩阵表示偏振元件的传输矩阵。假设入射辐射斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}$, 出射辐射的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}'$, 它们之间的数学关系可以写作:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \times \mathbf{S}, \quad (2)$$

本文采用一个线偏振片为基础的线偏振测量系统,其出射光的 Stokes 矢量可表示为:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_\alpha \times \mathbf{S}, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{M}_\alpha$ 为理想线偏振片的穆勒矩阵, α 表示偏振片透射方向与参考方向之间的角度。

$$\mathbf{M}_\alpha = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

由于成像探测器只能探测到辐射强度,即总光强的大小,所以只有 Stokes 的第一个参量可已被直接探测,经过计算:

$$I_\alpha = \frac{1}{2} (s_0 + s_1 \times \cos 2\alpha + s_2 \times \sin 2\alpha). \quad (5)$$

在实际的探测过程中,圆偏振分量相比于线偏量较小,所以不列入考虑,即令 $s_3 = 0$ 。从表达式(5)中得知,有 3 个未知量需要求出,为了使计算结果更加准确,选取测量 4 个角度的方法,即只需测量出 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个角度方向的光强,即可计算出 s_0, s_1 和 s_2 ,进而根据公式推算出偏振度和偏振角等相关参数。

3 长波红外偏振成像实验系统

实验选取了装置结构最简单紧凑、数据容易处理、精度较高的分时型长波红外偏振成像系统。为了解决分时型长波红外偏振成像结构实时性较

差的问题,采用高速旋转轮带动旋转偏振片,通过镜头成像在长波非制冷焦平面探测器上,来采集不同角度的偏振光强图像,进而解算出偏振度,实现线偏振测量。

因此,本文实验装置主要由高速旋转轮带动的偏振片、物镜以及探测器 3 部分组成。结构图如图 2 所示。

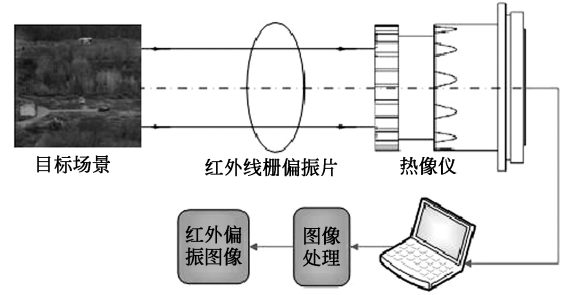


图 2 偏振成像系统结构图

Fig. 2 Polarization imaging system structure

就本文选取的分时型长波红外线偏振成像系统,由于它是在离散时间下获取不同偏振方向的图像,探测时间较长,如果测量动态目标就会带来偏差信息,因此传统装置较适合静态测量。为了



图 3 旋转轮实物图

Fig. 3 Rotating wheel map

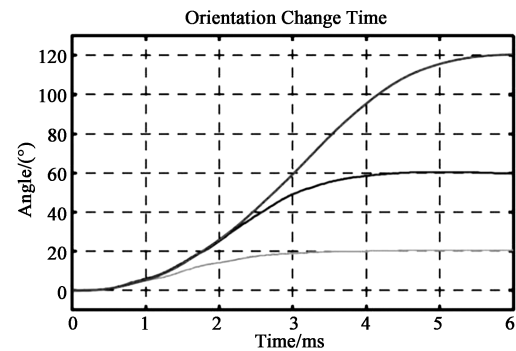


图 4 定向变化时间曲线

Fig. 4 Orientation change time curve

能够实现本文的实验目的,准确测量运动目标的偏振度图像,需要实现偏振片的准确定位和稳定停顿,并实现系统同步性。因此综合考虑后,选购了 FLI 公司的高速旋转轮,如图 3 所示,其采用

集成电子技术,可以快速改变光学元件的取向变化,并精确计时,所需的变化时间曲线由图 4 给出,技术参数由表 1 给出。

长波红外偏振片定制于美国 Thorlabs 公司,

表 1 高速旋转轮的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of high speed rotating wheel

旋转台类型	旋转范围	最大旋转速度	最小运动增量	最大角速度	尺寸	光学直径	厚度
直流伺服 电机控制	360°	60°/4 ms, 120°/5 ms	2.5°	25 000°/s	127 mm×102 mm× 25 mm	12.5 mm	1~3 mm

类型为硅基底线栅偏振片,具有高消光比,实物图及技术参数如图 5 和表 2 所示。



图 5 长波红外偏振片

Fig.5 Long wave infrared polarizer

表 2 长波红外偏振片的主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of long-wave infrared polarizer

尺寸	类型	材料	消光比
φ12.5 mm	金属栅	硅	>10 000

实验采用非制冷探测方式,且基于动态目标探测的目的,选购了可实时录制/传输/分析,可实现 60 Hz、16 bit 全温度红外视频数据,并且专用于高速成像的红外相机。红外相机各技术参数见表 3、表 4。实物如图 6 所示。

表 3 长波红外偏振探测器的主要技术参数

Tab.3 Main technical parameters of long wave infrared polarization detector

探测器类型	像素	像元间距	波长范围	热灵敏度
非晶硅非制冷型焦平面	640×480	17 μm	8~12 μm	<80 mK

表 4 长波红外镜头的主要技术参数

Tab.4 Main technical parameters of long-wave infrared lens

视场	焦距	<i>F</i> 数	最小成像距离
24.6°×18.6°	25 mm	1.0	0.3 m



图 6 长波红外相机

Fig.6 Long wave infrared camera

4 实 验

通过优化长波红外相机的操作界面功能,将高速旋转轮与长波红外相机进行同步,完成同步图像采集与处理过程,实现了 15 帧/s 的目标偏振度视频数据采集。实验平台及长波红外相机的操作界面如图 7 所示。

由于目前实验设备性能限制,以及长波红外偏振极易受环境影响,因此选择在实验室环境进行实验验证。

首先,目标选取高温金属罩暖炉,实验室环境,将暖炉预热完毕后,关闭电源,对暖炉由热至冷的变化过程进行偏振度动态探测。图 9 矩形框内为高温测量区域,图 10 为在 6 s 时间内采集的

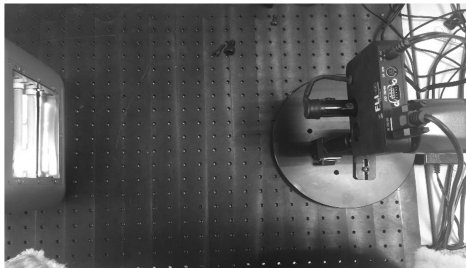


图 7 实验平台
Fig.7 Experiment platform

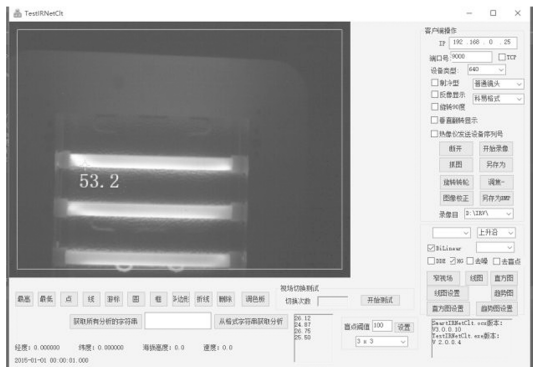


图 8 长波红外相机成像操作界面
Fig.8 Operation interface of long wave infrared camera imaging

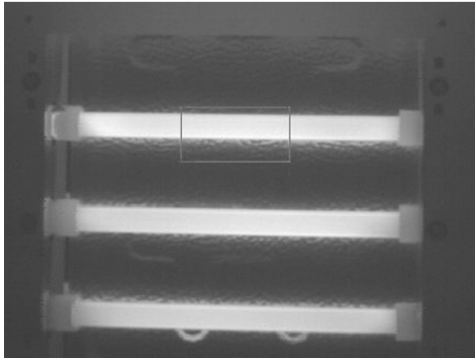


图 9 探测目标区域
Fig.9 Area of detection target

90 幅偏振度图像中,其偏振度最大值的变化拟合曲线。可以看出,实验实现了 15 帧/s 的动态偏振度探测,且在这个动态过程中,随着温度的骤变,偏振度也会有所减小。

接着,目标依旧选取高温金属罩暖炉,保持温度不变,针对目标实现红外强度图像与偏振度图

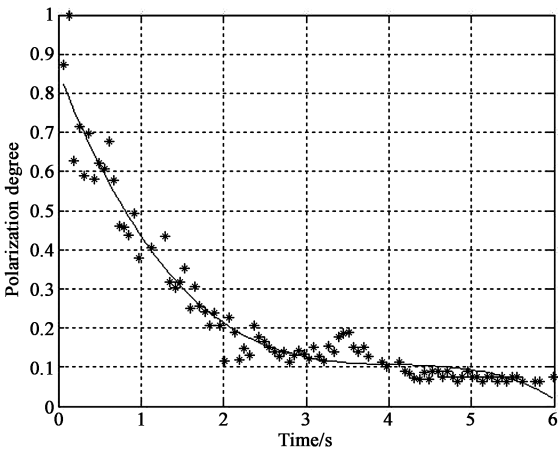
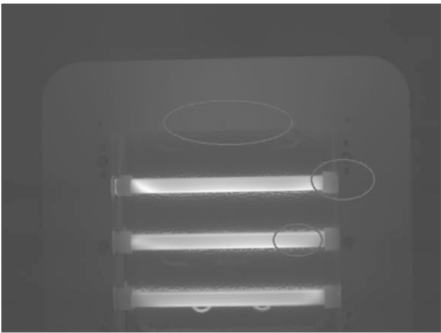


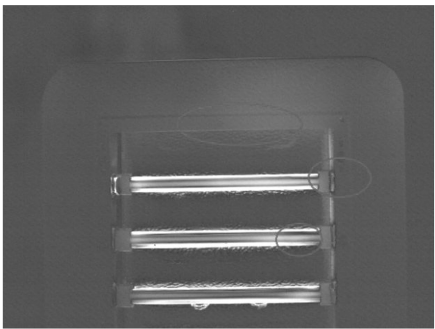
图 10 偏振度最大值变化拟合曲线
Fig.10 Curve of variation of maximum polarization degree

像的对比显示。图 11 为该目标长波红外强度与偏振度的视频截图图像。

由于暖炉具有较高温度,热辐射能量高于背



(a)无偏强度图像
(a) Intensity image



(b)偏振度图像
(b) Polarization image

图 11 金属外罩暖炉的长波红外偏振成像
Fig.11 Long-wave infrared polarization imaging of metal cover heater

景环境,与背景的对比度很高。强度图像虽然可以实现目标的探测,但由于观察的目标区域温差很小,使得细节模糊,很难实现识别功能,细节部分没有很好显现。而偏振度图像相比红外强度图像,细节更加突出,有效提高了人造物和背景的对比度。炉身的金属外罩的轮廓清晰可见,加热管内部的加热丝以及边缘细节信息也可明显看出(圆圈圈出)。这进一步证实长波红外偏振成像技术可对高温目标进行探测与识别,与红外成像相比,红外偏振成像提供了更多目标的细节,证明了偏振成像在高温目标成像上较强度成像有一定的

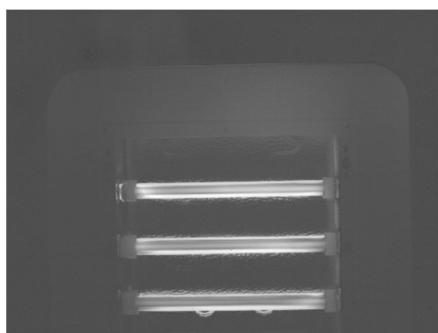


图12 融合结果

Fig.12 Fusion result

优势,有利于对长波红外偏振成像应用的进一步探究。

此外,通过融合算法,将红外强度图像和偏振度图像融合,发现相比于融合之前的图像,其信噪比有所提高,细节信息并没有损失,说明通过偏振图像的融合处理,能使偏振具有更好的成像效果,这为我们今后的偏振图像处理提供了思路与方法。

5 结 论

本文解决了传统分时型长波红外偏振成像装置难以高帧频探测的问题。通过实验证明,针对分时型长波红外偏振成像装置,可以实现探测动态高温运动目标的偏振度图像,并完成15帧/s的目标偏振度探测。并进一步证实,长波红外偏振成像在高温目标识别上具有优势,不仅能识别目标,而且可以提供更丰富的细节信息,抑制背景,提高目标与背景的对比度,有利于我们对目标场景的观察与理解。可以得出,长波红外偏振成像技术是对传统红外成像的一种有效的补充和发展,其研究对于目标探测和识别有着重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 王晓娟,赵宝奇,兰卫华,等.中长波红外偏振成像对比试验研究[J].电光与控制,2014,21(6):35-37.
WANG X J, ZHAO B Q, LAN W H, *et al.* Contrast experiment of medium-wave and long-wave infrared polarization imaging system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(6): 35-37. (in Chinese)
- [2] 徐参军,赵劲松,潘顺臣,等.长波红外偏振图像及其误偏振信息分析[J].红外技术,2012,34(2):103-108.
XU C J, ZHAO J S, PAN S C, *et al.* Analysis of LWIR polarization images and corresponding false polarization information [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 103-108. (in Chinese)
- [3] 刘宇轩,顾明剑.长波红外偏振探测性能分析与成像研究[J].科技和产业,2013,13(5):129-134.
LIU Y X, GU M J. Analysis and imaging performance of LWIR polarization detection [J]. *Science Technology and Industry*, 2013, 13(5): 129-134. (in Chinese)
- [4] HARCHANKO J S, CHENAULT D B. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry [C]//*Proceedings of SPIE 5888, Polarization Science and Remote Sensing II. San Diego, California, United States: SPIE*, 2005.
- [5] HARCHANKO J S, PEZZANITI L, CHENAULT D, *et al.* Comparing a MWIR and LWIR polarimetric imager for surface swimmer detection [C]//*Proceedings of SPIE 6972, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII. Orlando, Florida, United States: SPIE*, 2008.
- [6] 王霞,夏润秋,金伟其,等.红外偏振成像探测技术进展[J].红外与激光工程,2014,43(10):3175-3182.
WANG X, XIA R Q, JIN W Q, *et al.* Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- [7] 聂劲松,汪震.红外偏振成像探测技术综述[J].红外技术,2006,28(2):63-67.
NIE J S, WANG Z. Summarize of infrared polarization imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*,

- 2006, 28(2): 63-67. (in Chinese)
- [8] 王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 32-38.
WANG X, LIANG J A, LONG H B, *et al.* Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2016, 45(7): 32-38. (in Chinese)
- [9] GURTON K P, MCINTOSH S. Long-wave infrared (LWIR) polarimetric and radiometric analysis for a variety of thermal and electromagnetic suppressing materials [R]. Army Research Laboratory, 2014: 1-21.
- [10] AZZAM R M A. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal [J]. *Optics Letters*, 1978, 2(6): 148-150.
- [11] GOLDSTEIN D H. *Polarized Light* [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [12] BOWERS D L, BOGER J K, WELLEMS L D, *et al.* Evaluation and display of polarimetric image data using long-wave cooled Microgrid focal plane arrays [C]//*Proceedings of SPIE* 6240, *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing* VII. Orlando (Kissimmee), Florida, United States: SPIE, 2006.
- [13] CHUN C S L, SADIJADI F A. Polarimetric imaging system for automatic target detection and recognition [J]. *British Journal of Cancer*, 2000, 36(2): 35-42.
- [14] 张弛, 郭玉强, 孙玉宝. 液晶消色差偏振光开关[J]. 液晶与显示, 2018, 33(2): 109-115.
ZHANG C, GUO Y Q, SUN Y B. Liquid crystal achromatic polarized switch [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(2): 109-115. (in Chinese)

作者简介:



张 哲(1993—), 女, 山东曲阜人, 硕士研究生, 2016 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事红外偏振成像技术方面的研究。E-mail: 307679799@qq.com



王建立(1971—), 男, 山东曲阜人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2002 年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事空间目标探测技术、地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn