

文章编号: 1005-0523(2017)01-0008-06

分焦平面偏振成像关键技术

罗海波¹, 刘燕德², 兰乐佳², 叶双辉²

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2.华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 偏振成像是一项具有巨大应用价值的前沿技术, 近年得到了业内人士的广泛关注。文章介绍了偏振成像的原理、特点、应用以及国内外研究现状, 还介绍了几种常用的实现方法及其优缺点, 最后对当前偏振成像的主流方法——分焦平面法的关键技术进行了讨论。

关键词: 成像; 偏振成像; 分焦平面法; 插值; 非均匀性校正

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.002

偏振是光波的基本属性之一, 其中蕴含着被测物的众多特征信息。由于人眼对偏振信息不敏感, 所以一般情况下人眼所获得的信息主要来自于光的强度和光谱信息, 而忽略了光的偏振所反映的被测物信息。偏振成像是在原有的成像系统上增加偏振检测装置, 通过测量光线不同方向的偏振分量, 进而得到被测光线的部分或全部偏振状态信息, 通常用 Stokes 矢量^[1]或 Mueller 矩阵来表征被测光线的偏振状态。通过对这些偏振信息图像的分析 and 计算, 可以进一步得到更多的偏振参数图像, 如偏振度、偏振角、椭圆率角、偏振传输特性、去偏特性等, 其结果可用于分析被测物的形状、粗糙度、介质特性甚至生物化学等各项特征信息^[2]。通过将偏振信息和强度信息融合, 还可以达到增强目标的目的, 能提供更多维度的目标信息, 可有效提高对隐身、伪装目标的探测识别能力, 还可以抑制雾霾、烟尘以及诱饵等干扰。

偏振成像是一项具有巨大应用价值的前沿技术, 近年得到了业内人士的广泛关注。典型的偏振成像方法有分时法 (DoT)^[3], 分振幅法 (DoAM)^[4], 分孔径法 (DoAP)^[5] 以及分焦平面法 (DoFP)^[6-7]。分时法采用步进旋转偏振片, 在不同的时刻分别获得 4 个方向的光强响应, 从这 4 个光强响应中就能解算出景物光波的偏振态信息, 这种方法因为是在不同的时刻得到不同方向的光强响应, 故只适合于对静态场景成像。分振幅法利用分束镜、偏振分束器或沃尔斯通棱镜等分束光学器件结合成像透镜及多个成像探测器组成多个偏振探测通道, 获取得到同一目标场景的多幅图像, 在每个通道中放置不同方向的偏振片以获取目标不同偏振方向的强度图, 再利用数据约简矩阵得到目标的 Stokes 矢量图。分振幅法具有可同时成像, 数据处理简单等优点, 然而由于需要分成多个子光学系统, 采用多个成像探测器记录多幅偏振强度图像, 所以体积较大。且当各通道采用的光学系统和成像探测器的参数存在差异时, 会引入额外的偏振测量误差。分孔径法是指采用孔径分割的方法将整个系统分成多个子孔径, 每个子孔径分别采用不同的偏振元件, 以获取不同偏振态的强度图。这种方法通常在系统孔径处采用离轴的方法放置 4 个成像透镜阵列形成 4 个通道, 每个通道放置不同方向的偏振检测原件以获取不同偏振方向的强度图, 最终得到 Stokes 矢量图。4 个偏振通道共享一个前

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 南方山地果园智能化管理技术与装备协同创新中心(赣教高字[2014]60号)资助

作者简介: 罗海波(1967—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。辽宁省人工智能学会理事, 中国宇航学会光电技术专业委员会第二届委员会委员, 中国图像图形学会会员。参与多项国家重点项目的研究, 主持 10 余项课题研究, 获得国家发明二等奖 1 项; 军队科技进步一等奖 1 项; 国防科技进步三等奖 1 项; 军队科技进步三等奖 1 项。发表学术论文 20 余篇, 其中 EI 检索 14 篇; 获得发明专利 20 余件; 2009 年入选辽宁省“百千万人才工程”百人层次。

置物镜,通过合理安排,将 4 个偏振通道的图像成像在 1 个探测器上。分孔径偏振成像系统具有结构紧凑,数据处理方便等优点。但由于系统采用的分孔径分光系统一般为离轴或偏心系统,给设计和装调带来了一定的困难。而且像面上像点之间的配准误差会引入偏振测量误差。分焦平面法将偏振元件集成到焦平面上,焦平面 1 个像元对应 1 个微偏振元件,其工作原理如图 1 所示。图 1(a)是分焦平面偏振成像探测器结构示意图,在成像探测器焦平面上加工或粘贴一层微纳结构偏振阵列,每 4 个像元 1 组,分别敏感不同方向的偏振矢量。在偏振成像解算时,利用当前像元及其周围像元的响应直接或间接得到该像元对不同方向的偏振分量或偏振态,进而解算出 Stokes 矢量,完成偏振成像解算。分焦平面法可以同时获取入射光不同方向的偏振分量或偏振态,故既可对静态场景成像又可对动态场景成像,而且结构紧凑,体积小,是当前偏振成像的研究热点,也是未来偏振成像的主流方向。本文介绍了偏振成像在若干领域的应用,并对分焦平面偏振成像的关键技术进行了讨论。

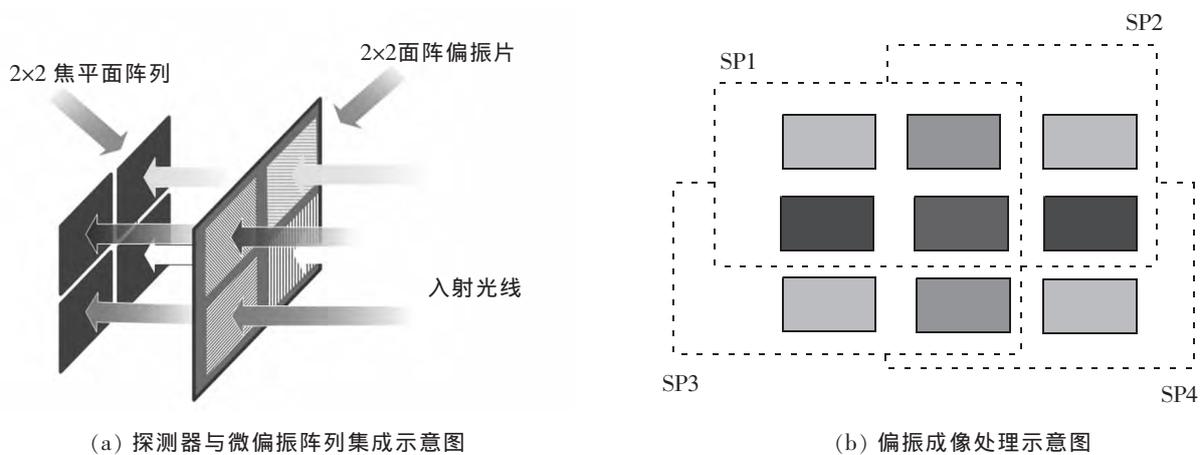


图 1 分焦平面偏振成像原理示意图

Fig.1 The diagrammatic drawing of polarization imaging

1 偏振成像的应用

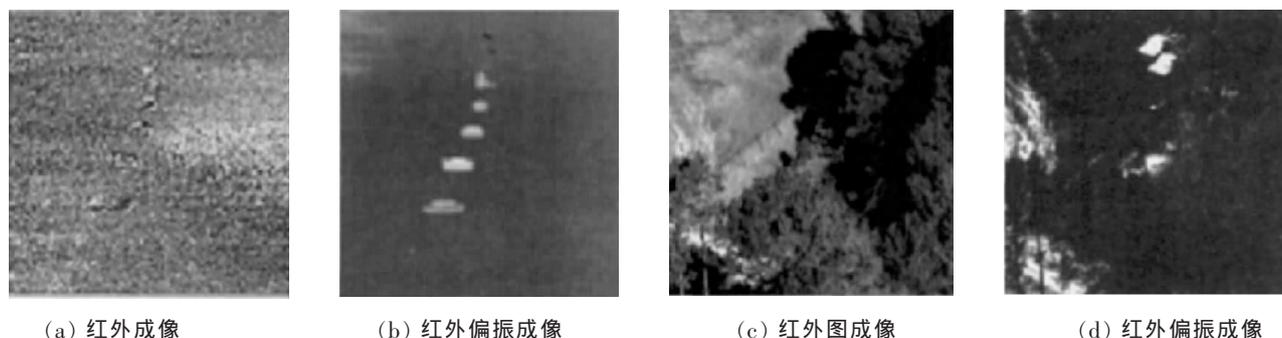
偏振成像在生物医学、材料学、遥感、大气光学、海洋探测、军事等领域都有重要的应用。偏振成像可以增强目标与背景的对比如,直接利用矢量图像或通过矢量彼此间的简单比值可以提高对场景细节的分辨能力,但更常见的是利用偏振度、偏振角等信息增强图像中目标的细节和形状信息。中科院安徽光机所研制的多波段偏振相机可以获取 4 个波段的 Stokes 矢量^[8],他们利用研制的多波段偏振相机对混凝土建筑物和路面等目标进行了识别实验,实验结果表明,偏振图像在获取目标纹理特征和表面状态信息等方面具有明显的优势^[9],利用偏振角图像还能表现出目标不同表面取向的细节特征^[10]。张绪国等在实验室条件下对主动式的偏振成像研究表明,反射率相近的物体在偏振度图像中得到了明显的区分,将强度图像和偏振度图像作对比,可以提高不同材料之间的分辨能力,尤其适用于人造目标在自然背景下的识别^[11]。

在生物医学领域,常见的应用是测量细胞或组织的 Mueller 矩阵,用于研究其生物特征或病理学诊断。由于生物组织不同结构间的偏振特性不同,利用 Mueller 矩阵显微镜可以进行生物组织结构方面的研究,如进行皮肤-肌肉组织的 Mueller 矩阵断层扫描,研究其轴向上的偏振特性分布,或进行真皮组织、骨组织结构研究等。在病理学诊断领域,可以通过偏振图像进行无接触、无痛和无损伤的病变诊断,尤其适用于皮肤和眼部的诊断。

偏振成像可实现对地偏振遥感,植物叶片、海洋、土壤、岩石等地物都会反射太阳光并在其中叠加偏振信息,因此偏振地物遥感在多种测量领域都有重要应用。由于海洋背景散射光的偏振度较大,因此偏振成像可以用于海洋生物学和海洋水体研究,如用于环保领域的海面漏油检测。在对地遥感中,河流和湖泊由于对周围景物的反射而使得在强度图中不易分辨,但采用偏振成像方法却可以较好地对其进行区分。此外,还可以

通过偏振遥感对土壤、雪地和植被进行检测,还可利用偏振度图像检测植物叶片含水量,进行农业研究和监测等。

在军事应用方面,英国国防科技实验室于2002年利用红外偏振技术开展扫雷实验,图2为传统成像和偏振成像的对比图,由图中可以看出,红外偏振成像技术在遮蔽目标检测效果方面明显优于传统红外成像技术。



(a) 红外成像

(b) 红外偏振成像

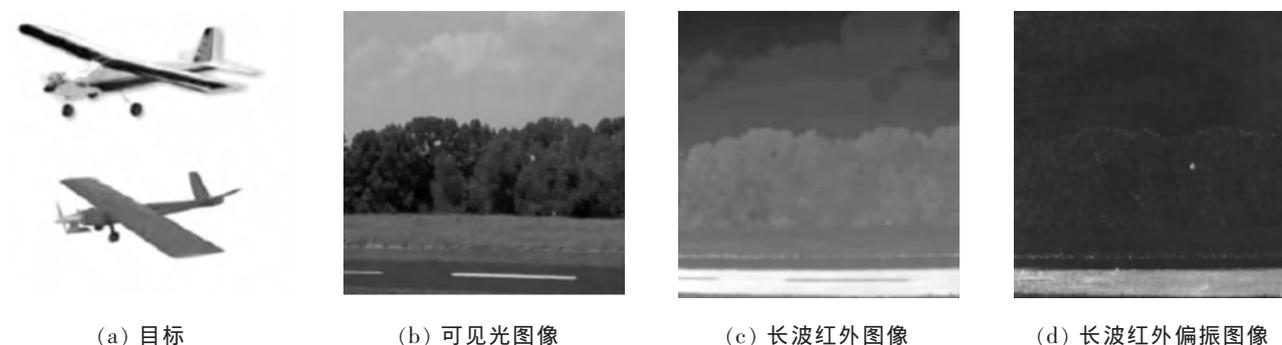
(c) 红外图成像

(d) 红外偏振成像

图2 英国国防科技实验室利用红外偏振成像进行扫雷实验

Fig.2 Demined experiments with infrared polarization imaging technology by British National Defense Science and Technology Laboratory

2011年,美国空军实验室(AFRL)在Wingmaster靶场开展了对空偏振成像目标跟踪实验,试验中对两种材质的小型遥控飞机在不同背景(包含天空、树林、跑道、草地)下进行长波红外偏振成像实验,图3为成像结果对比,由图中可以看出,在几乎所有的杂乱背景下,长波红外偏振成像更能凸显目标,长波红外偏振图像与长波红外图像相比,最大虚警率由0.52降为0.01,信杂比提升了3.4~35.6倍。



(a) 目标

(b) 可见光图像

(c) 长波红外图像

(d) 长波红外偏振图像

图3 美国空军2011年低空小型无人机长波红外偏振成像探测实验

Fig.3 Long wave infrared polarization imaging detection experiment of low altitude unmanned aerial vehicle in 2011 by United States Air Force

2 偏振成像的国内外研究现状

2008年,美国雷神公司研制了LWIR(HgCdTe)和MWIR(InSb)分焦平面红外偏振探测系统,达到了实时偏振探测要求,偏振光栅消光比达到100以上。2008年,美国在红石兵工厂、陆军研究发展工程中心(ARDEC)下属的精确武器实验室(PAL)、洛马公司的先进技术中心等开展了分孔径型偏振成像探测设备的武器效能实验,具备实战能力,可能已装备陆军。2010年,美国研制出基于反射/透射结构的可见光全偏振成像原理样机,2011年突破单波长全偏振成像的技术瓶颈,实现在较窄波段上全偏振图像的实时获取。2011年,美国亚利桑那大学联合其他几所大学进行了一种新型的偏振成像探测机理研究,即基于宽带偏振光栅的白光通道型偏振成像。该技术能较好地获取Stokes参数,有助于提高图像质量。2011年,美国圣地亚国立实验室和亚利桑那大学联合研制了多光谱红外偏振成像仪,工作波段覆盖短波红外和中波红外,并细分了

1.51, 2.32, 3.51, 4.17 μm 4 个光谱,属于 Stokes 偏振成像仪。2012 年,美军空军研究实验室(AFRL)开发了基于如图 4 所示的新型圆偏振滤光镜的偏振成像技术,该滤光片能同时获得圆偏振光和线偏振光,主要应用于增强“穿云透雾看穿战场”的能力,基于该方法的宽波段全偏振实时成像技术具有重要的军事应用潜力。2014 年,美国 4D 公司制备了四方向的微偏振阵列组件,在此基础上研制成功商业化的可见光偏振相机(如图 5 所示),该微偏振阵列的工作波段为 0.3~3 μm ,该技术有望应用于低成本的红外偏振成像系统。



图 4 采用微纳工艺的全偏振片
Fig.4 Full polarizing plate with micro nano technology

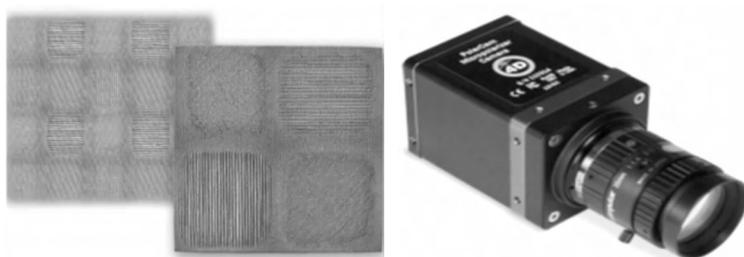


图 5 美国 4D 公司的微偏振阵列组件及商业化偏振相机
Fig.5 Micro polarized array assembly and commercial polarization camera of 4D company

3 分焦平面偏振成像的关键技术

分焦平面偏振成像技术是未来偏振成像领域的一个主流方向,但还存在一些关键技术需要攻克,主要体现在以下几个方面。

3.1 微偏振阵列与探测器封装技术

微偏振阵列的单元尺寸与红外焦平面探测器的像元尺寸设计一致,在将两者装配到一起时必须保证精确地对准,特别是对于制冷型红外探测器等需要在深冷条件下工作的器件,通常在常温下装配,但需要在较低的温度下工作(如制冷红外探测器通常工作于约 80 K 的低温下),如何保证低温下的对准精度是关键,需要考虑材料的膨胀系数以及装配工艺等因素。

另一方面,由于偏振阵列与探测器焦面(FPA)装配后,两者间总会存在一定的间距,这样在相邻像素间就会存在串扰,这种串扰会增加对场景偏振态测量的不确定性。有国外研究文献报道称,对于 30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的 3.4 μm 中波红外偏振阵列,当 FPA 与偏振片的距离从 0.5 μm 增加到 1.0 μm 时,消光比下降约 30%,是各种装配误差中影响最严重的一个。此外,像素尺寸越小,偏振阵列消光比下降越显著,串扰问题越难解决,因此,首先必须先对偏振阵列与 FPA 之间的间距对探测系统的性能影响进行精确的仿真与分析,以此为依据改进、优化相关的装配工艺,以保障偏振成像组件最终的消光比能够达到应用需求。

3.2 偏振成像插值方法

分焦平面成像是将微偏振阵列集成在成像焦平面上,通常采用的方法是每 2 \times 2 单元分别刻有 0 $^\circ$, 45 $^\circ$, 90 $^\circ$ 和 135 $^\circ$ 方向的光栅,该探测方式具有高透过率、高消光比、高实时性等优点,由于 Stokes 矢量所需的各个分量是通过邻域像元重建得到的,而相邻像元的瞬时视场不重叠,导致了瞬时视场误差,同时该探测方式降低了空间分辨率。为了弥补以上不足,需要采用插值算法对偏振图像进行误差补偿。

常用的分焦平面偏振图像插值算法主要有双线性插值、双三次插值和双三次样条插值。这 3 种算法可以在一定程度上抑制瞬时视场误差,但是这些算法本质上是低通滤波,平滑了图像的细节信息。张俊超等人提出了一种基于相关性的分焦平面偏振图像插值方法^[12],其主要思想是: 采用自适应插值算法进行对角方向插值,以获得相对应角度的强度值; 利用偏振强度相关性区分边缘与平滑区域,以及进行边缘方向的判定; 采用三次样条插值算法分别对平滑区域和边缘进行插值。实验结果表明,该方法可有效降低瞬时视场误差,更好地逼近原始场景的偏振信息。

3.3 偏振成像非均匀校正方法

偏振成像的非均匀性主要由探测器自身的非均匀性(主要指红外成像探测器, CCD不突出)、微偏振阵列的非均匀性以及光学系统的非均匀性耦合后产生的,微偏振阵列的非均匀性包括透过率的非均匀性和消光比的非均匀性,两种非均匀性耦合在一起,使得偏振成像的非均匀性校正问题比传统强度成像的非均匀性校正问题更为复杂。张俊超等人提出了一种基于标定的偏振图像非均匀性校正方法,利用穆勒矩阵能很好地描述偏振片特性的特点,利用穆勒矩阵和相机线性响应模型建立探测器输出与输入 Stokes 矢量的模型;然后利用积分球(或黑体)和高消光比线偏振片产生一组均匀的不同光强和不同角度的线偏振光,并采用最小二乘算法求解探测器偏移量和分析矩阵;再利用分析矩阵和平均分析矩阵求解校正矩阵;最后利用偏移量和校正矩阵对含有非均匀噪声的图像进行校正^[13]。实验结果表明,该方法取得了较好的效果。

3.4 偏振成像图像融合方法

偏振成像可以通过提取场景的偏振信息并将偏振信息和强度信息融合,以达到增强目标对比度的目的,但简单将各种信息叠加在一起效果并不理想,因此需要研究适当的图像融合算法,以突出目标,抑制杂波。在偏振度图像中,由于经过累加与除法运算,噪声往往比强度图像明显,在进行图像融合前,必须进行有效的降噪处理。一种可行的方法是采用显著性分布权重(SWM)去噪方法对偏振度图像进行去噪处理。SWM描述的是显著性图谱,能够表征图像中区域灰度对比度的分布情况;根据人眼视觉特性,图像灰度对比度大的区域更能吸引人眼的注意力。图6是采用SWM的降噪处理结果,由图中可以看出,经处理后,噪声得到了有效抑制。在基于机器视觉的目标检测与识别任务中,图像的视觉效果并不是十分重要,图像融合应侧重于特征级融合或决策级融合,以更充分地利用图像的信息。



(a) 原偏振度图像



(b) SWM 降噪结果

图6 偏振度图像 SWM 去噪结果

Fig.6 Results of polarization degree image with SWM

4 结论

对偏振成像的原理、特点、应用以及国内外研究现状进行了总结,在此基础上,对当前偏振成像的主流方法——分焦平面法的关键技术进行了讨论。学术界对偏振成像的研究虽然开始很早,但由于技术的限制,该领域的研究在2000年以后才开始活跃起来,并得到业界的重视,目前偏振成像还有一些关键技术需要突破,可以预见,随着相关技术的发展,偏振成像无论在技术方面还是在应用方面都将取得长足的进步。

参考文献:

- [1] STOKES G G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources[J]. Trans Cambridge Philos, 1852,9:399-416.

- [2] 张鹏. 成像式偏振测量的关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [3] HARNETT C K, CRAIGHEAD H G. Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7):1291-1296.
- [4] FARLOW C A, CHENAULT D B, SPRADLEY K D, et al. Imaging polarimeter development and applications[J]. *Proc SPIE*, 2002, 4481:118-125.
- [5] TYO J S. Hybrid division of aperture/division of a focal-plane polarimeter for real-time polarization imagery without an instantaneous field-of-view error[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(20):2984-2986.
- [6] PERKINS R, GRUEV V. Signal-to-noise analysis of Stokes parameters in division of focal plane polarimeters[J]. *Opt Express*, 2010, 18:25815-25824.
- [7] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, SHAW J A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22):5453-5469.
- [8] 罗睿智, 乔延利, 曹汉军, 等. 航空型多波段偏振遥感探测及其光学系统的研究与设计[J]. *量子电子学报*, 2002, 19(2):143-148.
- [9] 孙晓兵, 乔延利, 洪津, 等. 人工目标偏振特征实验研究[J]. *高技术通讯*, 2003(8):23-27.
- [10] 孙晓兵, 洪津, 乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2):256-260.
- [11] 张绪国, 江月松, 赵一鸣. 偏振成像在目标探测中的应用[J]. *光电工程*, 2008, 35(12):59-62.
- [12] ZHANG JUNCHAO, LUO HAIBO, HUI BIN, et al. Image interpolation for division of focal plane polarimeters with intensity correlation[J]. *Opt Express*, 2016, 24(18):20799-20807.
- [13] ZHANG JUNCHAO, LUO HAIBO, HUI BIN, et al. Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(26):7236-7240.

Key Technologies of Polarization Imaging for Division of Focal Plane Polarimeters

Luo Haibo¹, Liu Yande², Lan Lejia², Ye Shuanghui²

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Mechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Polarization imaging is an advanced technology with increasing applications and it has attracted wide attention in recent years. In this paper, theories, characteristics, applications and the research status of polarization imaging are introduced. The implementation of several common methods and their advantages and disadvantages are also explored. Finally, the key technologies of division of focal plane polarimeters which is the current mainstream method of polarization imaging are analyzed.

Key words: imaging; polarization imaging; division of focal plane polarimeters; interpolation; nonuniformity correction

(责任编辑 姜红贵)