

2.16 m 望远镜偏振光度计

邱 鹏¹, 王国聪², 张晓明¹, 张茗璇², 赵 勇³, 王建峰¹, 姜晓军^{1,4}

1. 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100101;
2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了使 2.16 m 望远镜具备线偏振测光观测能力, 开展了偏振光度计研制。该系统采用双通道分时偏振成像方案, 具有偏振定标单元、偏振测量单元, 可实现偏振定标、偏振测量和多色测光。完成系统研制后, 将其安装在 2.16 m 望远镜上开展实测, 依照该偏振光度计偏振观测流程拍摄了一系列非偏振标准星、偏振标准星、流量标准星; 按照偏振定标和偏振态解算数据处理方法, 对获取图像进行数据处理。结果显示: 该偏振光度计视场为 $4.63' \times 4.63'$, 像元比例尺为 $0.54''/\text{pixel}$, 偏振度测量精度优于 0.01, 60 s 曝光时间可以拍摄到 V 波段信噪比约为 141 的 15.3 等星。该偏振光度计使 2.16 m 望远镜具备 V 波段线偏振测光和快速多色测光观测能力。

关键词: 成像偏振测量; 偏振测光; 线偏振测光; 天文测光

中图分类号: P111.32 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220830

0 引 言

2.16 m 望远镜是我国自行研制的两米级赤道式望远镜, 位于中国科学院国家天文台兴隆观测基地。2.16 m 望远镜有主焦点、卡塞格林和折轴三个工作焦点, 其中卡塞格林焦点焦比为 $f/9$, 折轴焦点焦比为 $f/45$ 。该望远镜目前共有三套主要终端设备, 均工作在卡塞格林焦点, 分别为 OMR 卡焦光谱仪、高分辨率光纤光谱仪和北京暗天体摄谱成像仪^[1]。

作为一台通用型天文望远镜, 2.16 m 望远镜能够进行测光观测和光谱观测, 开展多种天文课题的观测研究, 其中包括剧烈活动天体, 如超新星爆发、伽玛射线暴等; 活动星系核、超大质量黑洞; 恒星活动和恒星的元素丰度; 类太阳系, 如类太阳星、太阳系外行星搜寻; 太阳系内天体, 如彗星、小行星等。

天体的辐射信息除了强度、频率特性外, 还具有偏振特性。天文测光观测和光谱观测可以获得电磁辐射的强度和光谱信息, 偏振观测可以获得电磁辐射

的偏振特性。目前, 我国在偏振成像方面的研究起步较晚, 2003 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了可见光和近红外波段的偏振相机, 并在航空实验中验证了多波段偏振信息获取的能力; 2007 年, 昆明物理研究所研制的红外偏振成像仪能准确测量辐射目标的偏振特性, 对偏振成像在军事领域的应用具有重大的意义; 此外, 中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院遥感应用研究所、国防科技大学、北京理工大学、北京航空航天大学等均开展了偏振成像方面的研究, 这些研究大多针对遥感、军事应用等^[2-3]。国外于 20 世纪 70 年代就开始了偏振探测技术研究, 在遥感和军事应用领域, 偏振成像已应用于反伪装、抗干扰、提高对目标的探测距离以及目标分类等^[4]; 在天文和空间目标观测领域, 国外很多望远镜具有偏振观测能力, 并取得了很多科研成果, 如位于西班牙拉帕尔马岛的利物浦望远镜, 口径 2 m, 焦比 $f/10$, 拥有 RINGO 系列及 MOPTOP 偏振测量设备, 对伽玛射线

收稿日期: 2022-11-21; 修订日期: 2023-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFA0406501)

作者简介: 邱鹏, 男, 工程师, 博士, 主要从事天文探测器应用与性能检测、望远镜控制、天文仪器与技术等方面的研究。

暴早期余辉进行观测,并观测研究了多个伽玛射线暴的早期偏振特征^[5-8];希腊 Skinakas 天文台 1.3 m 望远镜偏振探测设备 RoboPol 是一台四通道成像测光偏振仪,该装置只有滤光片转轮可动,其他元件都固定,结构紧凑,可以在 V、R、I 波段工作,已测量出一批耀变体的线偏振信息^[9]。

根据已有的伽玛射线暴光学余辉偏振观测结果^[10-12],大多数伽玛射线暴光学余辉线偏振度为 1%~5%,个别能达到 10%。从理论上讲,越早期,伽玛射线暴光学余辉越亮,线偏振度也可能越高。通过对伽玛射线暴余辉进行偏振观测,可以开展伽玛射线暴喷流的几何结构、磁场强度等研究。

为了开展相关研究,需要 2.16 m 望远镜具备偏振测光观测能力,为此开展了 2.16 m 望远镜偏振光度计的研发,完成了样机并安装在望远镜上进行了观星测试,实现线偏振测光和快速多色测光观测,可以开展伽玛射线暴、耀变体、小行星、空间目标^[13]等天文观测。

1 偏振光度计设计

1.1 偏振光度计功能

2.16 m 望远镜(如图 1 所示)偏振光度计具有四个主要功能:(a) 对天体目标进行线偏振测量;(b) 利用非偏振标准星对偏振成像系统进行偏振定标;(c) 对天体目标进行快速多色测光;(d) 根据用户需求,可在偏振测量模式、偏振定标模式与快速多色测光模式之



图 1 2.16 m 望远镜

Fig.1 2.16-m telescope

间进行切换。

1.2 探测器

偏振光度计使用的两台探测器均为 Andor 公司 iKon-L DZ936 CCD,该相机同样也被应用于 2.16 m 望远镜另外两个终端设备上,分别是 OMR 卡焦光谱仪和北京暗天体摄谱成像仪^[14-15]。iKon-L DZ936 CCD 相机的量子效率曲线和性能参数如图 2 和表 1 所示。

iKon-L DZ936 CCD 相机使用的是背照式科学级感光芯片,在 400~1 100 nm 波段范围内量子效率均较高。该相机可以制冷到-80 ℃,暗流低,可以对暗弱目标进行长时间积分观测。iKon-L DZ936 CCD 相机具有四个不同的读出速度,读出速度越慢,读出噪声越低,考虑到实际使用对读出速度和读出噪声的需求,选择 1 MHz 的读出速度,单幅图像的读出时间约为 4 s,读出噪声约为 $7 e^-$ 。

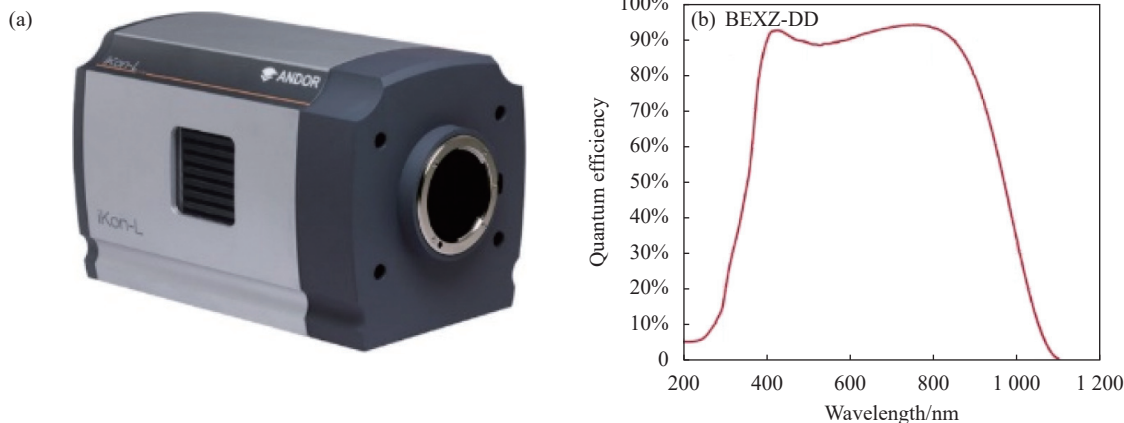


图 2 iKon-L DZ936 CCD 相机 (a) 和该相机的量子效率曲线 (b)

Fig.2 A camera of a iKon-L DZ936 CCD (a) and its quantum efficiency curve (b)

表 1 iKon-L DZ936 CCD 相机性能参数

Tab.1 Performance parameters of a iKon-L DZ936 CCD camera

Parameter	Value
Sensor type	Back-illuminated scientific CCD
Active pixels	2 048×2 048
Pixel size ($W\times H$)	13.5 $\mu\text{m}\times$ 13.5 μm
Sensor size	27.6 mm×27.6 mm
Shutter type	Mechanical shutter
Readout rate	0.05, 1, 3, 5 MHz
Readout noise (e^- , typical)	2.9@0.05 MHz; 7.0@1 MHz; 11.7@3 MHz; 31.5@5 MHz
Frame rate (fps full frame)	0.011@0.05 MHz; 0.221@1 MHz; 0.607@3 MHz; 0.953@5 MHz
Pixel full well depth (e^- , typical)	150 000
Cooling	-80 $^{\circ}\text{C}$ (@25 $^{\circ}\text{C}$)
Dark current ($e^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, typical)	0.006@ -80 $^{\circ}\text{C}$
Linearity	Better than 99%

注: Andor iKon-L 936 CCD相机相关参数来源于Andor官方网站: <https://andor.oxinst.com/>

1.3 工作波段

偏振光度计中配备了滤光片转轮及 Johnson/Bessell UVBRI 滤光片系统, 该滤光片系统的透过率曲线如图 3 所示, 在进行多色测光时, 可以通过滤光片转轮实现滤光片的快速切换, 完成对目标的多色测光观测。

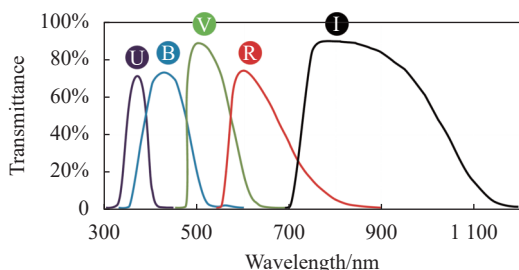


图 3 Johnson/Bessell UVBRI 滤光片系统透过率曲线

Fig.3 Transmittance curves of the Johnson/Bessell UVBRI filter system

2.16 m 望远镜偏振光度计优先满足 V 波段 (480~650 nm) 工作要求, 该设备使用的光学元器件工作波段如表 2 所示。

表 2 偏振光度计光学元器件工作波段

Tab.2 Optical components working band of the polarimeter

Optical components	Work band/nm
Collimating lens	390-780
Imaging lens	390-780
Half-wave plate	450-650
PBS	420-680
Polarizer	450-700

1.4 视场

受准直镜头、成像镜头以及偏振光学器件的限制, 该偏振光度计使用了 CCD 相机中心区域 512×512 进行成像, 视场约为 4.63'×4.63', 每个像元所对应的天空张角约为 0.54"。兴隆观测基地视宁度 (seeing) 均值约为 1.8~2.0", 星像占 3×3、4×4 pixel, 满足奈奎斯特采样定律。

通过开窗成像可以提高探测器的读出速度。为了提高偏振测量精度, 在观测时需要将目标调至视场中央位置。

1.5 偏振测量精度

2.16 m 望远镜偏振光度计的偏振测量精度技术指标为优于 0.01。为了达到高精度测量, 偏振光度计内有光学安装平台用于光学器件的安装。偏振光度计的框架和光学安装平台采用整体铸造制成, 在望远镜指向不同位置时, 不同姿态下的偏振光度计仍然具有非常高的稳定性, 确保偏振测量精度。

在观测时需要进行偏振定标, 偏振定标可以将望远镜和光学元件的偏振效应、偏振元件的方位或延迟量误差、各元件的装调误差等进行修正, 确保偏振测量精度。

1.6 偏振成像原理

常规光电成像探测器无法直接获取入射光的偏振态, 要想获得目标的偏振信息, 需要先得到该目标特定偏振状态下的光强, 再通过相应解算最终得到入射光的偏振态。采用 Stokes 矢量来描述光的偏振态^[16],

可以表示光任意偏振态,定义如下:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{+45} + I_{-45} \\ I_r - I_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_j 表示偏振态的强度 ($j = x, y, +45, -45, r, l$); I_x 表示水平线偏振光强 (0° 线偏振光强可以表示为 I_0); I_y 表示垂直线偏振光强 (90° 线偏振光强可以表示为 I_{90}); I_{+45} 和 I_{-45} 分别表示正、负 45° 线偏振光强; I_r 和 I_l 分别表示右旋和左旋圆偏振光强; S_0 和 I 表示偏振光的总强度; S_1 和 Q 表示在水平偏振方向上的光强 I_0 与垂直偏振方向上的光强 I_{90} 之差; S_2 和 U 表示在 45° 偏振方向上的光强 I_{45} 与 -45° 偏振方向上的光强 I_{-45} 之差; S_3 和 V 表示右旋圆偏振态的光强 I_r 与左旋圆偏振态的光强 I_l 之差。可见, Stokes 矢量中各参量均是特定情况下光的强度值,可以直接或间接通过光电成像设备获得。

线偏振度 (Degree of Linear Polarization, DoLP) 和线偏振角 (Angle of Linear Polarization, AoLP) 计算方法如公式 (2) 和公式 (3) 所示:

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (3)$$

1.7 偏振光度计设计方案

该偏振光度计采用一种结合同时成像和分时成像的双通道分时线偏振成像探测方式,其结构示意图如图 4 所示,通过法兰盘连接在 2.16 m 望远镜的卡焦单元上。该方案采用偏振分光棱镜 (Polarization Beam Splitter, PBS) 进行分光,使用两个相机进行同时成像,图像采集过程分两步完成:首先同时获取 0° 和 90° 偏振方向的图像;然后通过调整半波片的方向,再同时获取 45° 和 135° 透偏振方向的图像^[17]。

偏振光度计主要由偏振定标单元、偏振测量单元、光学镜头、控制器和相机构成,如图 5 和图 6 所示。偏振定标单元由偏振片、电控旋转台、电控位移平台构成,通过非偏振标准星进行偏振定标。偏振测量单元由滤光片、半波片、电控旋转台、偏振分光棱镜、电控位移平台构成,如图 7 所示,在进行偏振测量

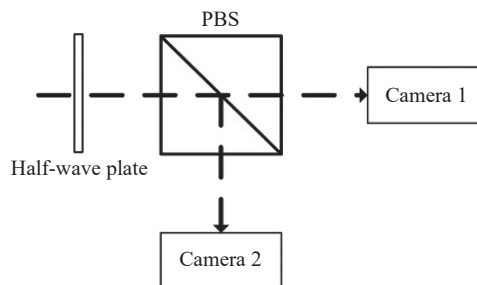


图 4 双通道分时偏振成像方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of a dual-channel time-division imaging polarimetry

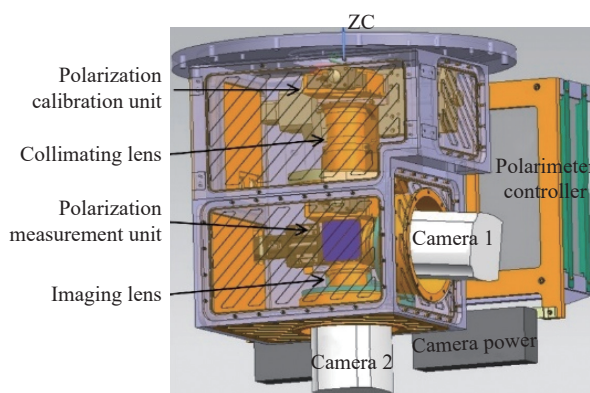


图 5 2.16 m 望远镜偏振光度计总体结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the overall structure of the 2.16-m telescope polarimeter

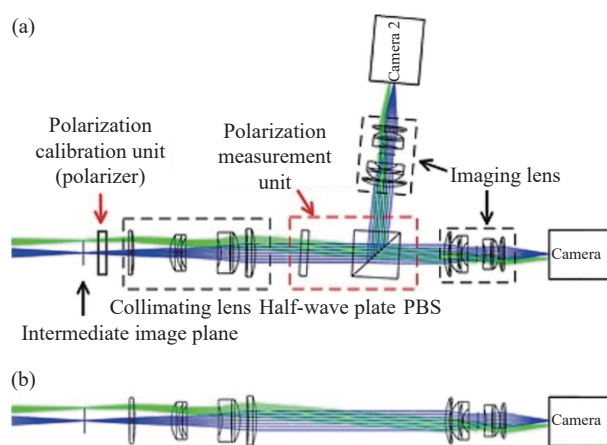


图 6 线偏振测光时 (a) 和多色测光时 (b) 2.16 m 望远镜偏振光度计光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of the optical path of linear polarization photometry (a) and multicolor photometry (b) of the 2.16-m telescope polarimeter

时,偏振定标单元通过电控位移平台切出光路。当偏振光度计进行多色测光观测时,同时将偏振定标单元

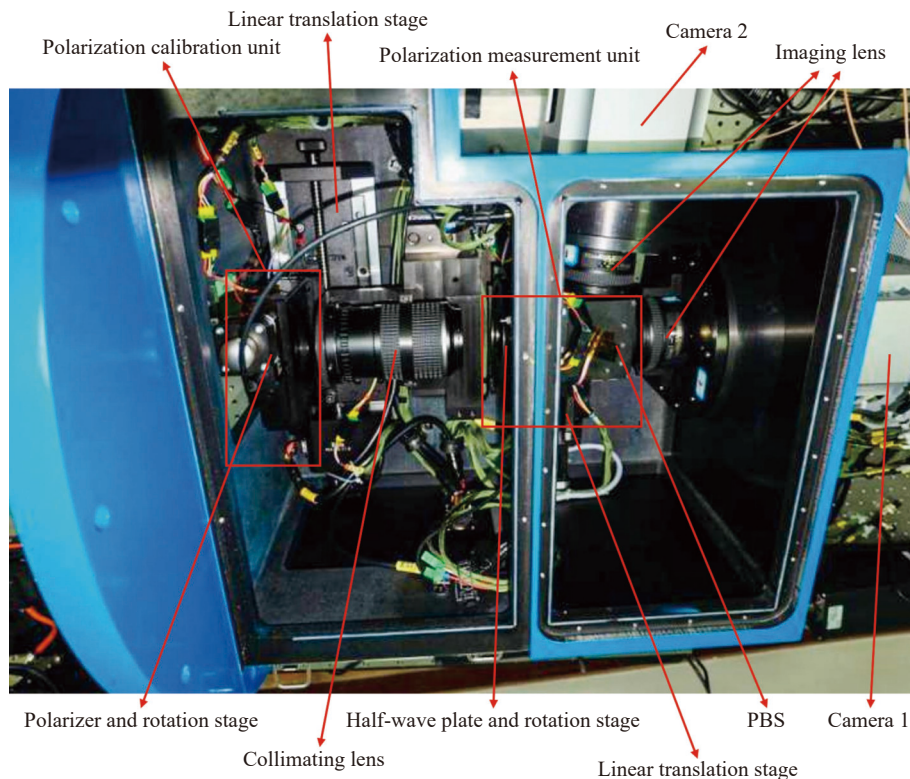


图 7 偏振光度计内部组成

Fig.7 Internal composition of the polarimeter

(偏振片)和偏振测量单元(半波片和偏振分光棱镜)通过位移平台切出光路,1号相机便可以进行多色测光观测。

2 偏振光度计偏振观测流程

2.1 偏振光度计工作流程

偏振光度计工作流程包括本底(BIAS)和平场(FLAT)拍摄及处理、偏振片初始角度标定、偏振定标、偏振测量,如图8所示。初次安装使用偏振光度计或者调整过偏振片后,需要对偏振片初始角度进行标定,方法为:选取一颗非偏振标准星对偏振片偏振方向的初始角度进行标定,并更新软件配置文件中存储的偏振片初始角度;若不需要重新对偏振片初始角度进行标定,则直接使用软件配置文件中存储的偏振片初始角度。

在偏振测量前,根据情况确定是否需要偏振定标,如需要,则根据软件中预设的流程进行偏振定标,获取偏振态测量矩阵存储并更新;如不需要,可使用软件中当前的偏振态测量矩阵,或者读取硬盘中存储的偏振态测量矩阵。

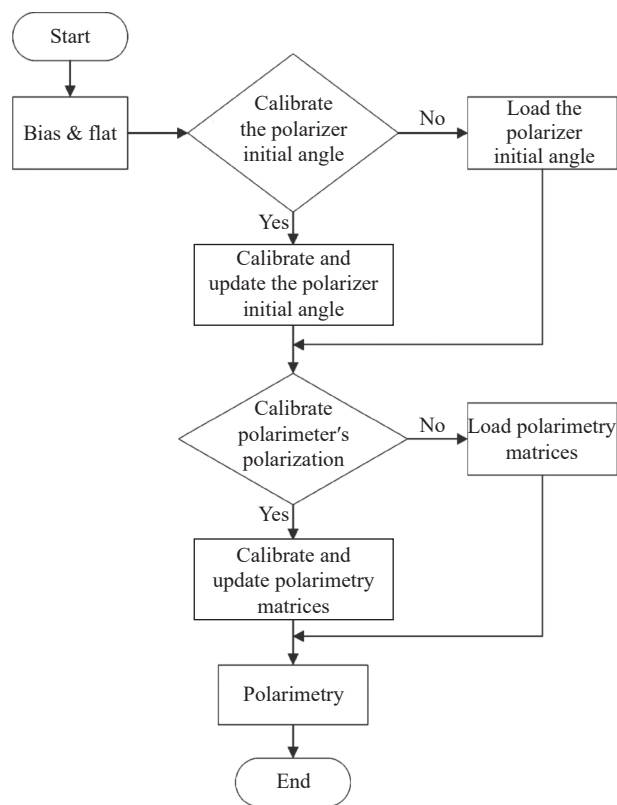


图 8 偏振光度计工作流程图

Fig.8 Flow chart of the polarimeter

2.2 偏振片初始角度标定流程

偏振片初始角度是指偏振定标单元中偏振片的偏振轴与偏振测量单元中偏振分光棱镜 P 轴的夹角 (如图 6、图 7 所示), 由于在设备装调时无法保证偏振片的偏振轴与偏振分光棱镜 P 轴对准, 为确保偏振定标时对目标偏振态调制的精度, 需要对这个初始角度进行标定。在偏振片初始角度标定时, 偏振片移入光路, 以非偏振标准星作为光源, 将偏振片角度从 -50° 至 50° 、以 10° 为间隔进行旋转, 将光源变为偏振光, 经半波片和 PBS 后, 在每个偏振片旋转角度下使用 1 号相机采集 n 幅图像, 存储图像并提取每幅图像中目标星的流量, 对每个偏振片旋转角度下的 n 个光强取平均, 得到 11 个光强值进行曲线拟合 (如图 9 所示), 曲线的极大值对应的位置即为偏振片的初始角度。

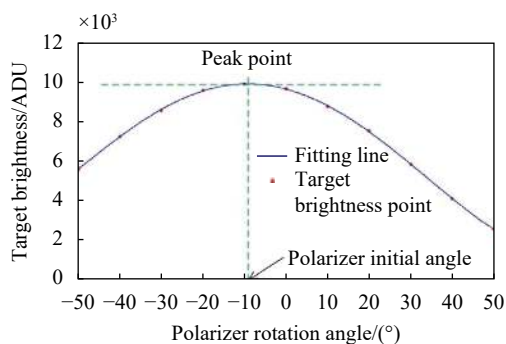


图 9 偏振片旋转时目标亮度变化曲线示意图

Fig.9 Schematic diagram of a target brightness change curve when the polarizer is rotated

2.3 偏振定标流程

偏振定标基本流程 (如图 10 所示) 如下: (a) 将偏振定标单元 (偏振片) 移出光路。(b) 半波片旋转到 0° , 两个相机同步采集 n 幅图像, 存储图像并提取目标流量; 半波片旋转到 22.5° , 两个相机同步采集 n 幅图像, 存储图像并提取目标流量, 共获取 $4 \times n$ 个目标光强数据。(c) 偏振定标单元移入光路, 偏振片按程序预设的四个角度 (22.5° 、 67.5° 、 112.5° 、 157.5°) 进行旋转, 在每个偏振片旋转角度重复步骤 (b), 获得不同偏振调制后的目标流量, 共获取 $16 \times n$ 个目标光强数据。(d) 用步骤 (b) 和步骤 (c) 中获取的 $20 \times n$ 个目标流量数据, 分别对相同状态下获得的 n 个光强取均值, 利用得到 20 个光强数据进行偏振定标, 得到偏振

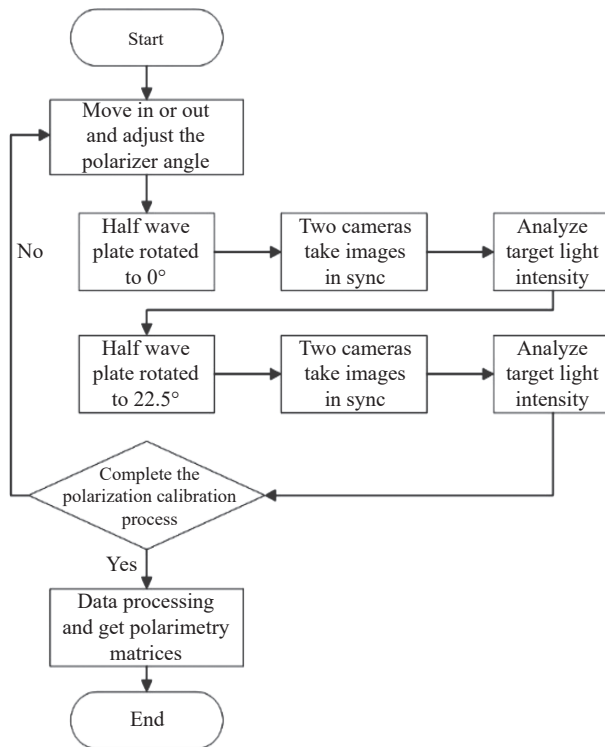


图 10 偏振定标基本流程图

Fig.10 Flow chart of polarization calibration

成像系统的偏振解算矩阵。

2.4 偏振测量流程

偏振测量基本流程 (如图 11 所示) 如下: (a) 将偏振定标单元移出光路。(b) 半波片旋转到 0° , 两个相机同步采集 n 幅图像, 存储图像并提取目标流量; 半

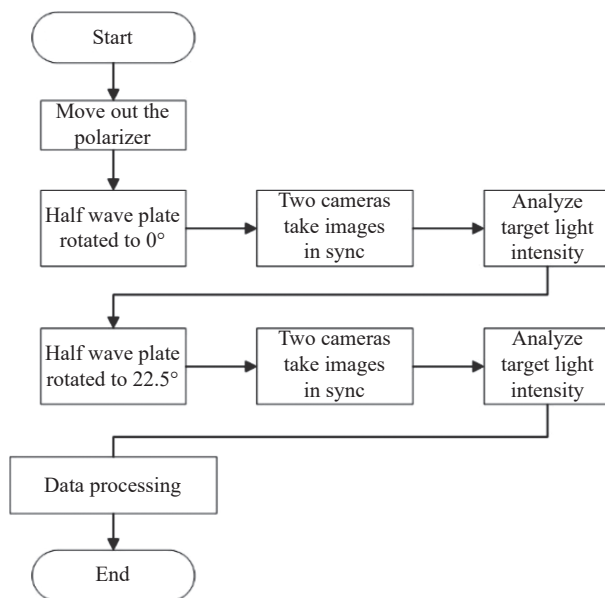


图 11 偏振测量基本流程图

Fig.11 Flow chart of polarization measurement

波片旋转到 22.5°, 两个相机同步采集 n 幅图像, 存储图像并提取目标流量, 共获取 $4 \times n$ 个目标光强数据。(c) 对获取的 $4 \times n$ 光强矩阵进行奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 滤波, 然后分别对相同状态下获得的 n 个光强取均值, 得到四个光强数据。(d) 利用步骤 (c) 中获得的四个光强数据组成光强矢量, 再使用偏振成像系统的偏振解算矩阵进行矩阵运算, 获得目标的 Stokes 矢量, 并利用目标的 Stokes 矢量解算目标偏振度。

2.5 多色测光流程

在多色测光时, 同时将偏振定标单元和偏振测量单元移出光路, 通过旋转滤光片转轮, 使用 1 号相机开展目标的多色测光, 如图 12 所示。

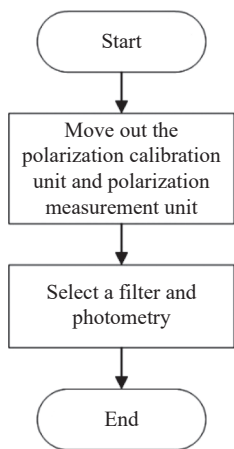


图 12 多色测光基本流程图

Fig.12 Flow chart of multicolor photometry

3 偏振光度计数据处理方法

3.1 偏振定标

偏振成像系统中光学器件的偏振效应、各成像通道的透过率差异、系统装调误差、相机响应差异等均会对偏振测量精度造成影响, 并且这一影响与入射光的偏振态、波长等因素相关。因此, 为了提升偏振测量精度, 需要进行偏振定标^[18]。

3.1.1 偏振定标原理

基于 Stokes 矢量和 Muller 矩阵, 偏振定标的基本原理是: 首先构建标准偏振光源产生 K 种已知偏振态的入射光; 然后使用待标定的偏振成像系统进行观测; 最后通过偏振成像系统各通道实测光强数据进行

求逆运算, 得出偏振成像系统的实际 Stokes 矢量解算矩阵 W 。在对 N 个偏振成像通道的偏振成像系统进行偏振定标时, 该过程可以表示为^[19]:

$$\begin{bmatrix} S_{1,0} & S_{2,0} & \cdots & S_{K,0} \\ S_{1,1} & S_{2,1} & \cdots & S_{K,1} \\ S_{1,2} & S_{2,2} & \cdots & S_{K,2} \\ S_{1,3} & S_{2,3} & \cdots & S_{K,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & \cdots & W_{N1} \\ W_{12} & W_{22} & \cdots & W_{N2} \\ W_{13} & W_{23} & \cdots & W_{N3} \\ W_{14} & W_{24} & \cdots & W_{N4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,K} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N,1} & I_{N,2} & \cdots & I_{N,K} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $S_{x,y}(x = 1, 2, \dots, K; y = 0, 1, 2, 3)$ 为第 x 个偏振入射光的第 y 个 Stokes 参量; $W_{x,y}(x = 1, 2, 3, 4; y = 1, 2, \dots, N)$ 表示 Stokes 矢量解算矩阵中的矩阵元; $I_{x,y}(x = 1, 2, \dots, N; y = 1, 2, \dots, K)$ 对应第 x 个偏振入射光、第 y 个通道的探测器接收到的光强。公式 (4) 可简化表示为:

$$S_i = W \cdot I \quad (5)$$

然后通过求解 S_i 的伪逆矩阵, 即可得到经过偏振定标后的 Stokes 矢量解算矩阵, 使用最小二乘法求解伪逆矩阵, 如公式 (6) 所示:

$$W = S_i \cdot (I)^T \cdot [I \cdot (I)^T]^T \quad (6)$$

由于望远镜和光学元件的偏振效应、偏振元件的方位或延迟量误差、各元件的装调误差等均会影响偏振定标的精度, 可采用基于非线性最小二乘拟合的偏振定标方法提升偏振定标准确性。非线性最小二乘拟合偏振定标方法是将可能存在误差和偏振成像系统测量矩阵 D 作为未知参数, 根据偏振定标系统结构和偏振成像探测理论建立探测光强与未知参数之间函数关系, 通过对探测到的光强信息进行非线性最小二乘拟合, 得出偏振成像系统测量矩阵 D , 最终得到偏振成像系统的 Stokes 矢量解算矩阵, 如公式 (7) 所示:

$$W = (D^T \cdot D)^{-1} \cdot D^T \quad (7)$$

3.1.2 基于非偏振标准星的偏振定标方法

一种典型的偏振定标系统如图 13 所示^[20], 使用积分球产生非偏振光, 经准直和偏振态调制后, 产生多个偏振态已知的平行入射偏振光。然后使用消偏振效应漫射器 (该部分不改变入射光偏振态, 或改变

量极小) 将平行入射偏振光转换为在一定角度内均匀分布的漫射偏振光, 经准直镜头准直后在偏振成像系统中各通道相机上成像, 然后即可利用公式 (5)~(7) 所

示的方法进行偏振定标。这种偏振定标方法需产生多个具有不同偏振态的偏振光, 因此该方法称为多点偏振定标法^[21]。

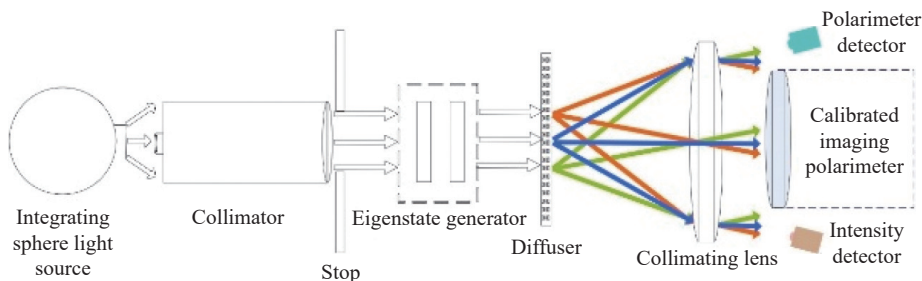


图 13 偏振定标方式示意图

Fig.13 Schematic diagram of the proposed polarization calibration

对于 2.16 m 望远镜偏振光度计来说, 进行偏振定标可以直接选用非偏振标准星作为平行入射的光源, 在望远镜一次像面附近加入旋转偏振片作为起偏装置(即偏振定标单元, 如图 5~图 7 所示)。该设备在进行偏振定标时, 将 Stokes 参量中非偏振标准星光强、偏振片初始角度 θ_{P0} 、偏振成像系统测量矩阵 D 中的各矩阵元 $d_{lr}(l = 1, 2, \dots, N; r = 1, 2, 3, 4)$ 作为未知参数, 根据偏振光传输理论可以得出偏振成像系统各通

道的探测光强矢量 I 与光源 Stokes 矢量 S_i 之间的关系如下:

$$I = D(d_{lr}) \cdot M_G(\theta_{P0}) \cdot S_i(s_0), l = 1, 2, \dots, N; r = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

式中: S_i 为光源的 Stokes 矢量矩阵; M_G 为起偏装置进行偏振调制时的 Muller 矩阵^[22], 如公式 (9) 所示:

$$M_G = [M_{G1} M_{G2} \dots M_{GK}] \quad (9)$$

其中, 第 K 个偏振调制下起偏装置的 Muller 矩阵 M_{GK} 可以表示为:

$$M_{GK} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & \sin 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & 0 \\ \cos 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & \cos^2 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & \sin 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) \cos 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & 0 \\ \sin 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & \sin 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) \cos 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & \sin^2 2(\theta_{P0} + k \cdot \Delta\theta_P) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\Delta\theta_P$ 为每次偏振片旋转的角度间隔; θ_{P0} 为起偏装置中线偏振片的初始角度。将公式 (8)~(10) 表示为函数形式, 则测量第 k 个入射光偏振态时, 偏振成像系统中第 n 个通道接收到的光强如公式 (11) 所示:

利用公式 (7) 即可得到偏振成像系统的 Stokes 矢量解算矩阵, 如公式 (13) 所示^[23]:

$$W_P = (\hat{D}^T \cdot \hat{D})^{-1} \cdot \hat{D}^T \quad (13)$$

$$I_n(\theta_{Pk}) = F(s_0, \theta_{P0}, \theta_{Pk}, d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}, \dots, d_{N1}, d_{N2}, d_{N3}, d_{N4}) \quad (11)$$

若偏振成像系统中的探测器像元获得的实际光强值记为 $\tilde{I}_n(\theta_{Pk})$, 则以公式 (11) 为目标函数, 对测量光强值 $\tilde{I}_n(\theta_{Pk})$ 进行非线性最小二乘拟合可以求解出该式中的各未知参数, 如公式 (12) 所示:

为了降低大气湍流闪烁和光强提取误差的影响, 可以在每个调制偏振态下取 n 幅图像进行光强平均, 然后再进行偏振定标处理。此外, 在偏振定标时, 通过合理地选择偏振片的旋转角度可以进一步减少光强闪烁带来的影响; 偏振角度选取应避免 0° 、 45° 、 90° 和 135° 及其附近的角, 避免目标光强过弱导致能量提取误差变大。该偏振光度计在偏振定标时选取的一组偏振片调制角度为 22.5° 、 67.5° 、 112.5° 和 157.5° , 并结合一组未加入偏振片的测量数据来提高偏振定标的精度。

$$\chi^2 = \min \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (\tilde{I}_n(\theta_{Pk}) - I_n(\theta_{Pk}))^2 \right\} \quad (12)$$

在拟合出偏振成像系统标定后的测量矩阵 \hat{D} 后,

3.2 偏振态解算

为了得到目标偏振态,需要获取四个调制偏振态下的目标光强,为降低大气湍流闪烁和光强提取误差对偏振测量精度的影响,每个调制偏振态下采集 n 幅图片提取光强,再对每个调制偏振态下的 n 组光强取均值。为了避免多次图像采集中存在异常数据点影响偏振测量精度,采用 SVD 滤波的方法平滑异常数据点的影响,将获取的 $4 \times n$ 个光强数据组成一个 $4 \times n$ 的矩阵,如公式 (14) 所示^[24]:

$$M_I = \begin{bmatrix} I_{0,1} & I_{0,2} & \cdots & I_{0,n} \\ I_{90,1} & I_{90,2} & \cdots & I_{90,n} \\ I_{45,1} & I_{45,2} & \cdots & I_{45,n} \\ I_{135,1} & I_{135,2} & \cdots & I_{135,n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

对 M_I 进行 SVD 分解,其中 SVD (M_I) 表示对矩阵进行 SVD 分解,可获得光强矩阵 M_I 的奇异值矩阵:

$$[U, S, V] = \text{SVD}(M_I) \quad (15)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} 、 S_{44} 为 M_I 矩阵的四个奇异值。由于采用的是线偏振成像方式,矩阵 M_I 的秩为 3,因此通过将奇异值矩阵 S 中的 S_{44} 置 0,即:

$$S' = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用新的奇异值矩阵重构出光强矩阵 $M_I' = U \cdot S' \cdot V^T$,可以有效降低异常数据点对偏振测量准确性的影响。然后,对重构光强矩阵中每个调制偏振态下的 n 个光强值取均值获得光强矢量:

$$I_P = [\bar{I}_0 \quad \bar{I}_{90} \quad \bar{I}_{45} \quad \bar{I}_{135}]^T \quad (18)$$

再利用公式 (13) 中获得的 Stokes 矢量解算矩阵 W_P 进行运算,可以得到目标星的 Stokes 矢量

$[S_{P0} \ S_{P1} \ S_{P2}]^T$ 和目标星偏振度 DoLP 如下:

$$[S_{P0} \ S_{P1} \ S_{P2}]^T = W_P \cdot I_P \quad (19)$$

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_{P1}^2 + S_{P2}^2}}{S_{P0}} \quad (20)$$

4 偏振光度计测试

选择晴朗、无月夜,将偏振光度计安装在 2.16 m 望远镜卡塞格林焦点上,如图 14 所示,两台 CCD 相机均使用 1 MHz 2×档位进行实测。按照第 2 节的偏振观测流程,拍完本底、平场,选择非偏振标准星 HD14069 进行偏振定标后就开始偏振测量观测。



图 14 偏振光度计安装在 2.16 m 望远镜卡塞格林单元上进行观星实测

Fig.14 The polarimeter was installed on the focal unit of the 2.16-m telescope for on-sky testing

4.1 偏振测量精度测试

偏振测量的目标有非偏振标准星 HD14069、偏振标准星 BD+64°106 和 VI Cyg #12,目标的名字、J2000.0 标准历元下的赤经 (Right Ascension, RA) 和赤纬 (declination, DEC)、V 波段星等 (magnitude, mag) 及标准星类型如表 3 所示^[25],偏振光度计实测图像如图 15 所示。

表 3 偏振光度计实测目标

Tab.3 Targets observed by the polarimeter

Name	RA (J2000.0)	DEC (J2000.0)	V mag	Comments
HD14069	02 16 45.16	-02 05 58.2	9.00	Unpolarized standard
BD+64°106	00 57 36.71	+64 51 26.5	10.34	Polarized standard
VI Cyg #12	20 32 40.94	+41 14 26.2	11.5	Polarized standard

非偏振标准星 HD14069 拍摄了 5 组, 曝光时间为 3 s; 偏振标准星 BD+64°106 和 VI Cyg #12 各拍摄了 10 组, 曝光时间为 1 s。按照第 3 节数据处理方法对实测数据进行处理, 得到目标偏振度如图 16 所示。经计算, 使用 2.16 m 偏振光度计实测 V 波段非偏振标准星 HD14069 的偏振度 $P(V)$ 为 $0.094\pm 0.043\%$, 星表^[24]中给出该目标偏振度为 $0.022\pm 0.019\%$; 分别实测偏振标准星 BD+64°106 和 VI Cyg #12 的偏振度 $P(V)$ 为 $5.676\pm 0.260\%$ 和 $9.043\pm 0.527\%$, 星表中给出这两个目标偏振度分别为 $5.687\pm 0.037\%$ 和 $8.947\pm 0.088\%$, 如表 4 所示。使用 2.16 m 望远镜偏振光度计对偏振标准星测量得到的线偏振度与星表中目标线偏振度差值均在测量误差范围内。从结果可以看出, 该偏振光度计线偏振测量精度优于 0.01。

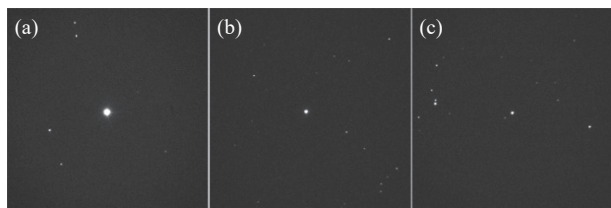


图 15 偏振光度计实测非偏振标准星 HD14069 (a)、偏振标准星 BD+64°106 (b) 和 VI Cyg #12 (c), 图像视场为 $4.63'\times 4.63'$, 像元比例尺为 $0.54''/\text{pixel}$

Fig.15 The polarimeter observed unpolarized standard target HD14069 (a), polarized standard targets BD+64°106 (b) and VI Cyg #12 (c). An FOV of the image is about $4.63'\times 4.63'$, the pixel scale is $0.54''/\text{pixel}$

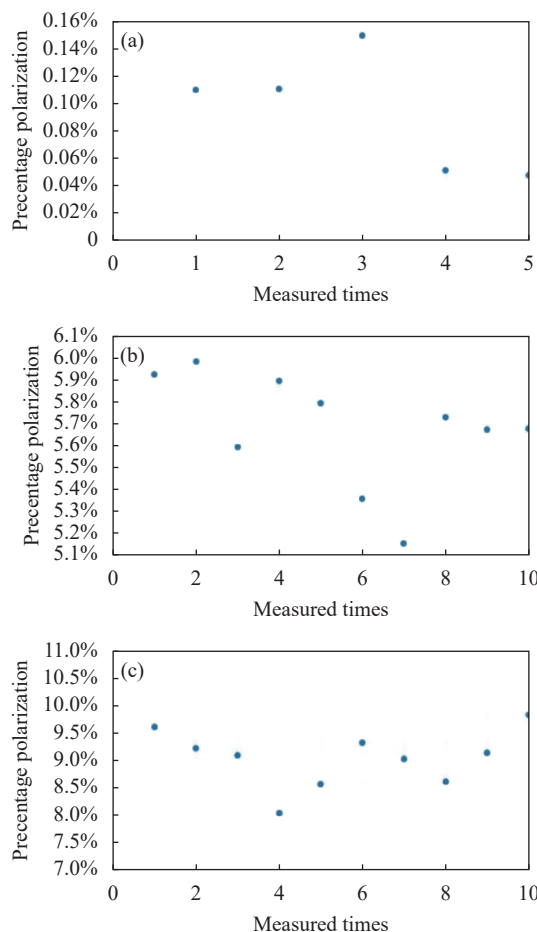


图 16 多次测量非偏振标准星 HD14069 (a)、偏振标准星 BD+64°106 (b) 和 VI Cyg #12 (c) 的偏振度

Fig.16 The polarization of the unpolarized standard target HD14069 (a), polarized standard targets BD+64°106 (b) and VI Cyg #12 (c) measured multiple times

表 4 偏振光度计实测 V 波段非偏振标准星 HD14069、偏振标准星 BD+64°106 和 VI Cyg #12 的偏振度结果, 并与 Schmidt, Elston & Lupie (1992) 文献中数据进行比较

Tab.4 The polarization of the unpolarized standard target HD14069, polarized standard targets BD+64°106 and VI Cyg #12 measured by the polarimeter for V band. Polarimetric archival data from Schmidt, Elston & Lupie (1992) for the unpolarized and polarized (in V band) standard stars

Name	Catalogue percent $P(V)$	Measured percent $P(V)$	Difference percent $P(V)$
HD14069	$0.022\pm 0.019\%$	$0.094\pm 0.043\%$	0.072%
BD+64°106	$5.687\pm 0.037\%$	$5.676\pm 0.260\%$	0.011%
VI Cyg #12	$8.947\pm 0.088\%$	$9.043\pm 0.527\%$	0.096%

4.2 偏振光度计性能测试

在偏振测量中, 偏振测量精度 ΔP 与信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 关系如下^[26]:

$$SNR = \frac{\sqrt{2}}{\Delta P} \quad (21)$$

即如果测量目标偏振度的偏振测量精度要优于 1%, 那么该目标的信噪比要大于 141。所以在实际观时, 为了获得高精度的偏振测量数据, 需要获得信噪比足够高的目标图像。为了对偏振光度计性能进行测试, 拍摄了朗道标准星如图 17 所示, 标准星的信息如表 5 所示。所有图像首先经过本底和平场改正, 然后使用 SExtractor^[27] 软件对图像进行测光处理, 最后筛选出符合信噪比要求的目标星, 结果如图 18 所示。为了使目标偏振度测量精度达到 1%, 即目标图像信

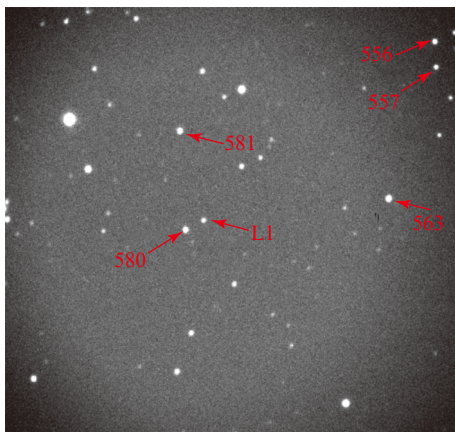


图 17 偏振光度计拍摄的朗道标准星 98 581、98 L1、98 580、98 556、98 557、98 563

Fig.17 Landolt equatorial standards of 98 581, 98 L1, 98 580, 98 556, 98 557, 98 563 observed by the polarimeter

表 5 偏振光度计实测 Landolt 标准星

Tab.5 Landolt equatorial standards observed by the polarimeter

Name	RA (J2000.0)	DEC (J2000.0)	V mag
98 L1	06 51 39	-00 26 16	15.67
98 581	06 51 40	-00 25 21	14.56
98 580	06 51 40	-00 26 21	14.73
98 556	06 51 30	-00 24 30	14.14
98 557	06 51 30	-00 24 45	14.78
98 563	06 51 32	-00 26 04	14.16

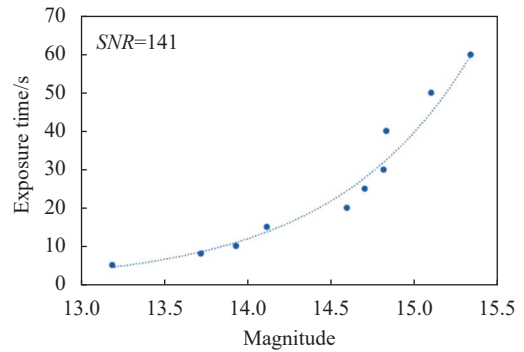


图 18 当 SNR 约为 141 时, 曝光时间和 V 波段星等关系

Fig.18 Exposure times with respect to V-band magnitudes when SNR is about 141

噪比达到 141, 该系统 60 s 曝光时间可以拍摄到 V 波段 15.3 等星。

5 总结与展望

经过收集国内多家单位对 2.16 m 望远镜偏振测光观测的需求, 确定了偏振光度计功能和技术指标, 进一步开展偏振光度计设计。该偏振光度计采用双通道分时偏振成像方案, 使用两台相机进行同时成像, 对目标拍摄两次即可获得其线偏振度。该偏振光度计具有偏振定标单元、偏振测量单元, 可实现偏振定标、偏振测量和多色快速测光。文中给出了该偏振光度计的工作流程, 包括偏振片初始角标定、偏振定标、偏振测量和多色测光, 并给出了目标偏振态解算数据处理方法。

设计、加工完成后, 将偏振光度计安装在 2.16 m 望远镜上开展观星实测。按照偏振光度计工作流程, 首先使用非偏振标准星进行偏振定标, 然后拍摄了一系列偏振标准星, 经数据分析, 该偏振光度计视场为 $4.63' \times 4.63'$, 像元比例尺为 $0.54''/\text{pixel}$, 线偏振测量精度优于 0.01。拍摄了一系列流量标准星, 经天文测光数据处理, 结果显示该系统 60 s 曝光时间可以拍摄到 V 波段信噪比约为 141 的 15.3 等星。

由于研发限制, 2.16 m 望远镜偏振光度计优先满足 V 波段 (480~650 nm) 工作要求, 该偏振光度计所使用的偏振光学元件、缩焦镜、成像镜等均为货架产品, 如若有其他工作波段的需求, 可以通过更换偏振部件等进行升级。此次天文实测样本和实测次数不多, 可以对该系统开展进一步的性能测试。

参考文献:

- [1] Fan Zhou, Wang Huijuan, Jiang Xiaojun, et al. The Xinglong 2.16-m telescope: Current instruments and scientific projects [J]. *PASP*, 2016, 128: 115005.
- [2] Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing. Application of polarization measurement in the identification of the space targets [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(3): 200-203. (in Chinese)
- [3] Yang Changjiu, Li Shuang, Qiu Zhenwei, et al. Study on image registration of simultaneous imaging polarization system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 262-267. (in Chinese)
- [4] Luo Haibo, Zhang Junchao, Gai Xingqin, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210987. (in Chinese)
- [5] Steele I A, Bates S D, Guidorzi C, et al. RINGO2: an EMCCD-based polarimeter for GRB followup [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7735: 773549.
- [6] Arnold D M, Steele I A, Bates S D, et al. RINGO3: a multi-colour fast response polarimeter [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8446: 84462J.
- [7] Shrestha M, Steele I A, Piascik A S, et al. Characterization of a dual-beam, dual-camera optical imaging polarimeter [J]. *MNRAS*, 2020, 494: 4676-4686.
- [8] Maund J R, Steele I, Jermak H, et al. RINGO3 polarimetry of the Type I superluminous SN 2017egm [J]. *MNRAS*, 2019, 482: 4057-4061.
- [9] Ramaprakash A N, Rajarshi C V, Das H K, et al. RoboPol: a four-channel optical imaging polarimeter [J]. *MNRAS*, 2019, 485: 2355-2366.
- [10] Covino S, Wiersema K, Fan Y Z, et al. The unpolarized macronova associated with the gravitational wave event GW 170817 [J]. *Nature Astronomy*, 2017, 1(11): 791-794.
- [11] Steele I A, Kopa D, Arnold D M, et al. Polarimetry and photometry of gamma-ray bursts with RINGO2 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 843: 143.
- [12] Gorbovskoy E S, Lipunov V M, Buckley D A H, et al. Early polarization observations of the optical emission of gamma-ray bursts: GRB 150301B and GRB 150413A [J]. *MNRAS*, 2016, 455: 3312-3318.
- [13] Wang Guocong, Wang Jianli, Zhang Zhenduo, et al. Polarization analysis of the telescope system used for space target polarization detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1211003. (in Chinese)
- [14] Qiu Peng, Mao Yongna, Lu Xiaomeng, et al. Evaluation of a scientific CMOS camera for astronomical observations [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, 13(5): 615-628.
- [15] Qiu Peng, Zhao Yong, Zheng Jie, et al. Research on performances of back-illuminated scientific CMOS for astronomical observations [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(10): 268.
- [16] Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and Polarized Light[M]. Liang M J, Yin S B, Zhang F C, et al. translated. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [17] Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Review of imaging polarimetry based on Stokes vector [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(1): 56-62. (in Chinese)
- [18] Boulbry B, Ramella R J C, Germer T A. Improved method for calibrating a Stokes polarimeter [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8533-8541.
- [19] Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [20] Zhang Y, Zhao H, Li N. Polarization calibration with large apertures in full field of view for a full Stokes imaging polarimeter based on liquid-crystal variable retarders [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1284-1292.
- [21] Wang Yonghui, Zheng Chunlong, Zhao Zhen tang. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 19(31): 1108013. (in Chinese)
- [22] Lu Yongnan. Study on the design and application of polarization imaging optical system[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [23] Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, et al. Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1915-1922. (in Chinese)
- [24] Wang Guocong. Research on ground-based polarization imaging detection of low earth orbit space target[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [25] Schmidt G D, Elston R, Lupie O L. The hubble space telescope northern-hemisphere grid of stellar polarimetric standards [J]. *The Astronomical Journal*, 1992, 104: 4.
- [26] The Liverpool Telescope. RINGO3 [EB/OL]. [2023-03-22]. <https://telescope.livjm.ac.uk/TelInst/Inst/RINGO3/#sensitivity>.
- [27] Bertin E, Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction [J]. *A & AS*, 1996, 117: 393.

The 2.16-m telescope polarimeter

Qiu Peng¹, Wang Guocong², Zhang Xiaoming¹, Zhang Mingxuan²,
Zhao Yong³, Wang Jianfeng¹, Jiang Xiaojun^{1,4}

(1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

3. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective In addition to intensity and frequency characteristics, celestial radiation also possesses polarization characteristics. Photometry and spectrophotometry can provide information on the intensity and spectral characteristics, while photopolarimetry can provide information on the polarization characteristics. Polarimetric observations of astronomical objects are of great significance for studying gamma-ray bursts, quasars, and spatial targets. To carry out such research, it is necessary for the 2.16-m telescope (Fig.1) to have the capability of polarization photometry, which leads to the development of a polarimeter for the 2.16-m telescope.

Methods The polarimeter adopts a dual-channel time-division linear polarization imaging detection method combining simultaneous and time-resolved imaging (Fig.4), which mainly consists of a polarization calibration unit, a polarization measurement unit, optical lenses, controllers, and cameras (Fig.5-6), enabling polarization calibration, polarization measurement, and multicolor photometry. The polarimeter uses a polarization beam splitter and two cameras for simultaneous imaging. The image acquisition process is completed by two steps. First, images are obtained simultaneously for the 0° and 90° polarization directions; Then, by adjusting the orientation of the half-wave plate, images are obtained simultaneously for the 45° and 135° transmission polarization directions. The working process of the polarimeter (Fig.8) includes the obtaining and processing of bias and flat images, initial angle calibration of the polarizer (Fig.9), polarization calibration (Fig.10), and polarization measurement (Fig.11).

Results and Discussions Following the completion of instrument development, the polarimeter was installed on the 2.16-m telescope for on-sky testing. Following the working process of the polarimeter, a series of unpolarized standard stars were chosen for polarization calibration, and polarimetric measurement observations were conducted (Fig.15). Then, a series of polarization results for polarized standard stars were obtained (Tab.4, Fig.16). The results showed that the polarization measurement accuracy of the polarimeter was better than 0.01. By observing Landolt standard stars (Fig.17), the limiting magnitude result with a polarization measurement accuracy of 0.01 was obtained (Fig.18).

Conclusions The polarimeter adopts a dual-channel time-division linear polarization imaging method and uses two cameras for simultaneous imaging, which allows for the acquisition of the linear polarization degree of an object for two times. The polarimeter has a polarization calibration unit, a polarization measurement unit,

enabling polarization calibration, polarization measurement, and multi-color photometry. This paper provides the working process of the polarimeter, including initial angle calibration of the polarizer, polarization calibration, polarization measurement, and multi-color photometry. The paper also gives the processing method for calculating the polarization of targets. After the installation on the 2.16-m telescope, the polarimeter was tested with unpolarized standard stars for polarization calibration, followed by a series of polarized standard stars for testing. The data analysis showed that the polarimeter had a field of view of $4.63' \times 4.63'$ and a pixel scale of $0.54''/\text{pixel}$, and the polarization measurement accuracy was better than 0.01. A series of Landolt standard stars were also observed, and the data processing results showed that a 60 s exposure time is capable of capturing a 15.3 magnitude V-band target with a signal-to-noise ratio of 141. The polarimeter enables the 2.16-m telescope to perform V-band linear polarization photometry and multicolor photometry observations.

Key words: imaging polarimetry; photopolarimetry; linear polarization photometry; photometry

Funding projects: National Key R&D Program of China (2020YFA0406501)