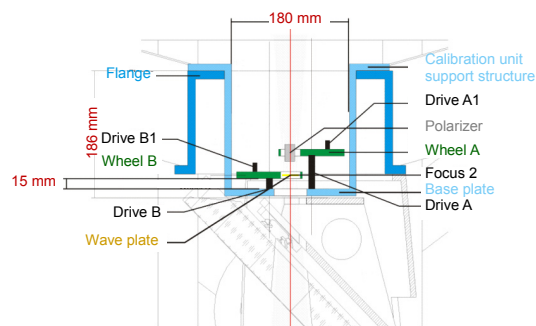




DOI: 10.12086/oe.2018.180058

## 1.8 m 太阳望远镜偏振标定单元设计

姚本溪<sup>1,2,3</sup>, 饶长辉<sup>1,2\*</sup>, 顾乃庭<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 中国 1.8 m 太阳望远镜(Chinese large solar telescope, CLST)致力于对太阳偏振的高精度及高灵敏度测量。然而其系统本身会引入仪器偏振, 并且在望远镜运行的过程中, 仪器偏振会随其指向的变化而变化。这就降低了系统的测量精度。因此, 需要一个偏振标定单元对其仪器偏振进行标定。为此, 本文对偏振标定的原理和方法进行了研究, 并且给出了针对 CLST 的偏振标定单元设计方案。

**关键词:** 太阳望远镜; 偏振测量; 标定; 仪器偏振

**中图分类号:** O436.3

**文献标志码:** A

**引用格式:** 姚本溪, 饶长辉, 顾乃庭. 1.8 m 太阳望远镜偏振标定单元设计[J]. 光电工程, 2018, 45(11): 180058

## Polarization calibration unit design of 1.8 m Chinese large solar telescope

Yao Benxi<sup>1,2,3</sup>, Rao Changhui<sup>1,2\*</sup>, Gu Naiting<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** It is the main task for the Chinese large solar telescope (CLST) with a 1.8 m aperture to measure the solar polarization with a high accuracy and sensitivity. However, the telescope system itself will introduce instrumental polarization. It also will change constantly with the rotating of the telescope and will reduce the accuracy. Therefore, a calibration unit is necessary to calibrate it. In this paper, we introduced the polarization calibration method and proposed a calibration unit structure.

**Keywords:** solar telescope; polarimetry; calibration; instrumental polarization

**Citation:** Yao B X, Rao C H, Gu N T. Polarization calibration unit design of 1.8 m Chinese large solar telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(11): 180058

收稿日期: 2018-01-29; 收到修改稿日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11178004, 11727805)

作者简介: 姚本溪(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事太阳望远镜偏振测量技术的研究。E-mail: yao\_b\_x@126.com

通信作者: 饶长辉(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事大口径高分辨率光学成像望远镜技术研究和系统研制工作。

E-mail: chrao@ioe.ac.cn

## 1 引言

太阳的各种活动现象多与太阳磁场有关,对太阳磁场的测量有助于研究日冕加热、耀斑触发、日冕物质抛射等现象的物理机制<sup>[1]</sup>。对太阳磁场的测量,通常是采用对特定磁敏感谱线的偏振测量来实现的。目前,国外已经建造了多台大口径的太阳望远镜(例如:VTT<sup>[2]</sup>,GREGOR<sup>[3]</sup>,GST<sup>[4]</sup>),同时还有多台望远镜正在设计制造(例如:DKIST<sup>[5]</sup>,EST<sup>[6]</sup>)。在很久之前,我国就致力于太阳磁场测量技术的研究和设备的研制。建立了包括多通道太阳磁场望远镜、全日面太阳色球磁场望远镜、太阳光谱望远镜及云南天文台 1 m 新真空太阳望远镜(NVST)等太阳观测设备<sup>[7-9]</sup>。为了实现对太阳磁场的精确测量,就要求偏振测量达到较高的测量精度和灵敏度。然而,偏振测量仪中的光学元件加工和装配难免是非理想的,其偏振调制矩阵难免存在误差。另一方面,望远镜系统中的光学器件将改变太阳光的偏振态,同样会引入仪器偏振。并且在观测过程中,由于望远镜指向位置的不同,系统中的某些反射镜入射面会发生相对旋转,从而导致仪器偏振不断变化。为此,2014年袁沫对 NVST 的仪器偏振进行了建模分析<sup>[10]</sup>;GREGOR 太阳望远镜装备了偏振标定单元(GREGOR polarimetric unit, GPU),用来对望远镜仪器偏振进行标定<sup>[11]</sup>;EST 同样提出,将在第二个焦点处放置偏振标定单元<sup>[12]</sup>。

中国 1.8 m 太阳望远镜(Chinese large solar telescope, CLST)是一台正在建设中的地平式同轴格里高利望远镜,其主镜口径为 1.76 m。CLST 将装备光栅光谱仪来实现斯托克斯谱线轮廓的测量,同时将装备珐琅干涉滤光器来进行斯托克斯偏振成像。为了实现较高的偏振测量精度(目标为  $10^{-4}I_c$ ,  $I_c$  为太阳连续光谱强度)装备偏振标定单元对 CLST 望远镜具有重要意义。因此本文将从以下几个方面对 CLST 偏振标定进行分析:第二部分对 CLST 光学系统进行简单介绍;第三部分介绍偏振标定的基本原理和方法;第四部分对 CLST 偏振标定单元结构进行初步设计。

## 2 CLST 太阳望远镜简介

CLST 是一台经典的同轴格里高利望远镜,其光学系统如图 1 所示<sup>[13]</sup>。CLST 望远镜主镜 M1 为口径 1.8 m(1.76 m 通光孔径)的抛物镜,其将太阳成像在主焦点 F1 处。CLST 在 F1 处装备具有温度控制能力的热视场光阑,用于限定系统的视场并反射掉 99% 的太阳辐射

能量。次镜 M2 是一个双曲面镜,在其焦点 F2 处,将配备系统校正设备。第三镜 M3 成像在位于观测室的 Coudé 焦点 F3 处,其与主镜 M1、次镜 M2 共同构成同轴光学系统。第四镜 M4 至第八镜 M8 为平面反射镜,它们将光束引入后端仪器系统。第八镜 M8 位于机械转台上,转台将随望远镜不同的指向而转动,用于消除因望远镜转动引起的像面旋转。M8 后为后端仪器系统(包括自适应光学系统、光谱仪及偏振测量仪等),其具体的光学结构仍处于设计阶段。CLST 光学系统的参数指标如表 1 所示。

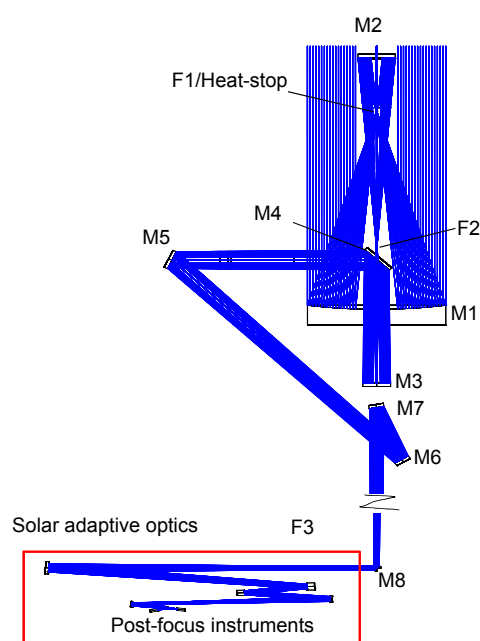


图 1 CLST 光学系统图  
Fig. 1 Optical scheme of CLST

CLST 望远镜采用了地平式机械结构,可以实现风速在 20 m/s 时对目标精确的跟踪。当望远镜指向不同的高度时,镜筒带动反射镜 M1 至 M4 转动, M4 与 M5 将发生相对旋转;当望远镜指向不同的方位角时, M7 与 M8 将发生相对旋转,从而导致仪器偏振不断变化。

## 3 偏振标定原理

目前偏振标定方法主要包括:四点偏振标定法<sup>[14]</sup>、E-P 偏振标定法<sup>[15]</sup>、傅里叶分析偏振标定法<sup>[16]</sup>和非线性拟合偏振标定法<sup>[17]</sup>等。四点偏振标定法具有较高的

表 1 CLST 系统参数指标

Table 1 The parameters of CLST system

Parameter	Value
Aperture size of M1/mm	Φ1800
Field of view (FOV)/(°)	≥Φ3
Wavelength cover/nm	380~2500
Image space F#	F/54.5
Focal length/m	~96

信噪比，且只需要四次标定调制就可以对全穆勒矩阵进行标定，具有较高的时间分辨率，因此在望远镜运行过程中的动态仪器偏振标定时，CLST 将采用四点偏振标定法。

光的偏振信息可以用斯托克斯矢量  $S$  表示，而传输介质对光偏振态的作用可以用穆勒矩阵  $M$  表示。对于偏振态为  $S_0$  的待测光，其经过望远镜成像后偏振态变为  $S$ ，其表达式：

$$S = MS_0 \quad (1)$$

其中  $M$  为望远镜系统穆勒矩阵。偏振测量仪将对改变后的斯托克斯矢量  $S$  进行测量，而望远镜系统的穆勒矩阵未知，无法准确地得到目标的斯托克斯矢量  $S_0$ 。因此，要想对太阳本征偏振进行精确测量，需要提前对望远镜系统的仪器偏振进行标定。

如图 2 所示，在望远镜系统前加入偏振标定单元。当偏振态为  $S_0$  的光经过标定单元后，出射光  $S_n$  与标定单元的调制状态有关，通过改变标定单元的调制状态，可以得到特定的已知偏振态的光。出射光  $S_n$  经过望远镜系统后，光的偏振态进一步变为  $S'_n$ ：

$$S'_n = MS_n \quad (2)$$

通过四次偏振标定调制，得到偏振态为  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  的标定光，分别测量其经过望远镜系统后的偏振态  $S'_1, S'_2, S'_3$  和  $S'_4$ ，得到：

$$[S'_1 \ S'_2 \ S'_3 \ S'_4] = M[S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4] \quad (3)$$

只要矩阵  $[S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]$  可逆，即可求出望远镜系统的穆勒矩阵  $M$  的值：

$$M = [S'_1 \ S'_2 \ S'_3 \ S'_4][S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]^{-1} \quad (4)$$

CLST 偏振标定单元采用旋转偏振片和  $\lambda/4$  波片的方式进行调制。已知偏振片的穆勒矩阵为

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} M_{p11} & M_{p12} & M_{p13} & 0 \\ M_{p21} & M_{p22} & M_{p23} & 0 \\ M_{p31} & M_{p32} & M_{p33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{p44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中：

$$\begin{aligned} M_{p11} &= K_1 + K_2, \\ M_{p12} &= M_{p21} = (K_1 - K_2) \cos 2\theta, \\ M_{p13} &= M_{p31} = (K_1 - K_2) \sin 2\theta, \\ M_{p22} &= (\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2})^2 \cos^2 2\theta + 2\sqrt{K_1 K_2}, \\ M_{p23} &= M_{p32} = (\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2})^2 \cos 2\theta \sin 2\theta, \\ M_{p33} &= (\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2})^2 \sin^2 2\theta + 2\sqrt{K_1 K_2}, \\ M_{p44} &= 2\sqrt{K_1 K_2}, \end{aligned}$$

$K_1, K_2$  为偏振片起偏方向及其垂直方向的光强透过率。对于理想的偏振片  $K_1=1, K_2=0$ 。 $\theta$  为偏振片起偏轴与坐标系  $X$  轴之间的夹角。波片的穆勒矩阵为

$$M_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{r22} & M_{r23} & M_{r24} \\ 0 & M_{r32} & M_{r33} & M_{r34} \\ 0 & M_{r42} & M_{r43} & M_{r44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中：

$$\begin{aligned} M_{r22} &= \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta, \\ M_{r23} &= M_{r32} = \frac{1}{2} \sin 4\theta (1 - \cos \delta), \\ M_{r24} &= -\sin 2\theta \sin \delta, \\ M_{r33} &= \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta, \end{aligned}$$



图 2 偏振标定原理示意图

Fig. 2 Optical scheme of polarization calibration method

$$\begin{aligned} M_{r34} &= \cos 2\theta \sin \delta, \\ M_{r42} &= \sin 2\theta \sin \delta, \\ M_{r43} &= -\cos 2\theta \sin \delta, \\ M_{r44} &= \cos \delta, \end{aligned}$$

$\theta$  为波片快轴方向与坐标系  $X$  轴之间的夹角,  $\delta$  为波片的相位延迟量。对于理想的四分之一波片  $\delta=90^\circ$ 。

当光源的光  $S_0$  依次通过偏振片和  $\lambda/4$  波片后, 其偏振态变为  $S$  :

$$S = M_r(\delta, \theta_2) M_p(\theta_1) S_0, \quad (7)$$

其中:  $M_p, M_r$  分别表示偏振片和波片的穆勒矩阵。

假定偏振片和  $\lambda/4$  波片均为理想的光学元件, 将  $S$  进行归一化后得到 :

$$\begin{aligned} S &= \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \\ I &= 1, \\ Q &= \cos^2 2\theta_2 \cos 2\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 4\theta_2 \sin 2\theta_1, \\ U &= \frac{1}{2} \sin 4\theta_2 \cos 2\theta_1 + \sin^2 2\theta_2 \sin 2\theta_1, \\ V &= \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_1. \end{aligned} \quad (8)$$

经过四次调制后, 可以得到 :

$$\begin{aligned} [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4] &= \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 \\ Q_1 & Q_2 & Q_3 & Q_4 \\ U_1 & U_2 & U_3 & U_4 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{bmatrix}, \\ I_i &= 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_i &= \cos^2 2\theta_{i2} \cos 2\theta_{i1} + \frac{1}{2} \sin 4\theta_{i2} \sin 2\theta_{i1}, \\ U_i &= \frac{1}{2} \sin 4\theta_{i2} \cos 2\theta_{i1} + \sin^2 2\theta_{i2} \sin 2\theta_{i1}, \\ V_i &= \sin 2\theta_{i2} \cos 2\theta_{i1} - \cos 2\theta_{i2} \sin 2\theta_{i1}. \end{aligned} \quad (9)$$

只要四次调制中满足矩阵  $[S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]$  可逆, 即可实现偏振标定功能。CLST 拟采用的调制方案如表 2 所示。此时偏振调制矩阵可逆, 满足偏振标定条件。

$$[S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

偏振标定单元提供已知偏振态的光作为激励, 通过测量其经过望远镜系统后的响应, 来标定望远镜系统的穆勒矩阵。为了实现较高的标定精度, 就要求标定单元本身具有较小的误差。偏振标定单元的调制矩阵与偏振片的消光比  $\kappa$ 、波片相位延迟  $\delta$  和调制角度  $\theta_1, \theta_2$  有关。2013 年, 侯俊峰对偏振标定误差与标定单元光学元件的加工和装配精度的关系进行了详细分析<sup>[17]</sup>, 结合 CLST 偏振测量精度目标 ( $10^{-4} I_c$ ), 我们给出了标定单元的精度要求, 如表 3 所示。

在偏振片和波片存在加工及装配误差的情况下, 我们选择对其参数指标进行校准, 然后用校正后的参数进行偏振调制矩阵计算以提高偏振标定精度。

## 4 CLST 偏振标定单元设计

偏振标定单元可以对位于其后的光学系统的仪器

表 2 偏振调制方案

Table 2 Polarization modulation program

Number	Polarizer angle/(°)	$\lambda/4$ wave plate angle	Stokes
1	0	none	$[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$
2	45	none	$[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$
3	90	none	$[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$
4	0	45°	$[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

表 3 偏振标定单元精度要求

Table 3 Accuracy requirement of polarization calibration unit

Parameter	Error
$\kappa$	<0.001
$\theta_1/(^\circ)$	<0.05
$\delta/(^\circ)$	<0.1
$\theta_2/(^\circ)$	<0.05

偏振进行标定。然而, CLST 望远镜主镜为 1.8 m, 要对其标定, 需要采用同样口径的偏振片和波片, 这是难以实现的。由 J Sánchez Almeida 在 1991 年对望远镜焦平面处仪器偏振的分析可知<sup>[18]</sup>, CLST 作为同轴光学系统, 主镜、次镜及第三镜是旋转对称的结构, 由其产生的仪器偏振可以忽略。反射镜 M4 及其后的光路中, 系统对称性遭到破坏, 需要对其仪器偏振进行标定。如图 3 所示, 在 CLST 第二焦点 F2 处, 光束直径较小, 并且具有一定的空间可以装备偏振标定单元, 来实现对 CLST 仪器偏振的标定。

F2 处光学系统的参数如表 4 所示。

由表 2 可知, 在调制序列为 1、2、3 时, 只利用

偏振片产生线偏振光, 而波片无需移进光路, 这样可以减小因波片的加工和装配不理想引起的标定误差。因此将偏振片和波片放置于两个不同的转盘上。

如图 4 所示 CLST 标定单元由两个转盘 A 和 B 组成, 转盘直径约为 100 mm。转盘 Wheel A 和 Wheel B 中分别有六个通光孔, 通光孔直径约为 28 mm。转盘分别由两个电机(Drive A 和 Drive B)驱动旋转, 可以根据需要将不同的通光孔切换入光路中。用于可见光和近红外波段的偏振片分别位于转盘 Wheel A 的通光孔 A1 和 A2 中, 偏振片的方位角由电机 Drive A1 驱动旋转, 以实现不同状态的调制。用于可见光和近红外波段的  $\lambda/4$  波片分别位于转盘 Wheel B 的通光孔 B1 和

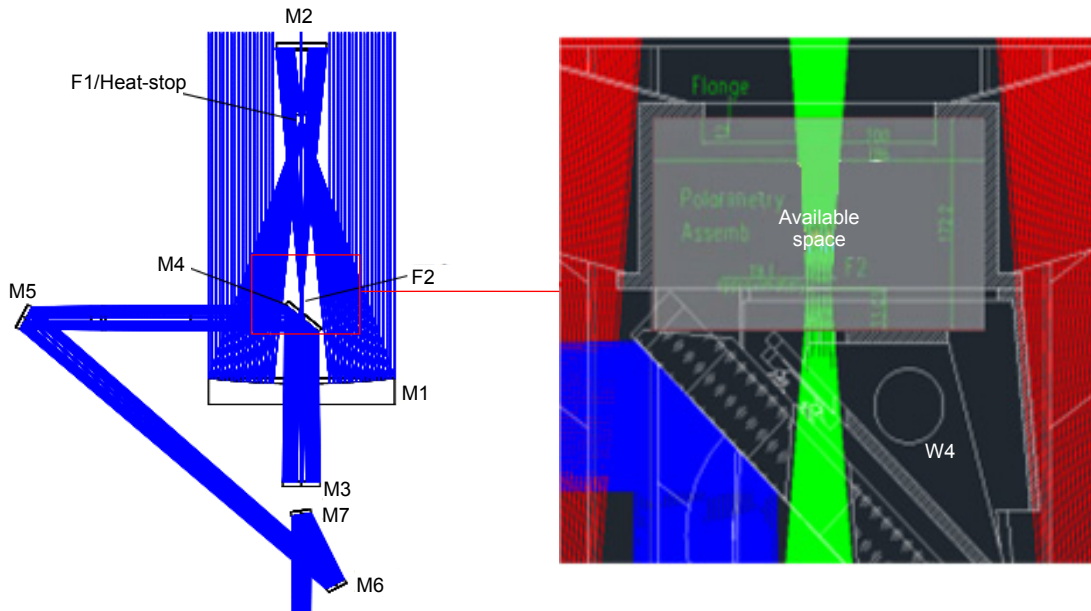


图 3 标定单元在 CLST 中的位置  
Fig. 3 The place of calibration unit in CLST

表 4 F2 焦点系统参数

Table 4 System parameters in F2

Parameter	Value
Circular diameter/mm	27
Image scale/("/mm)	18.93
Focal length/mm	10897
F ratio	6.2
Power density/(W/cm <sup>2</sup> )	26
Power/W	160

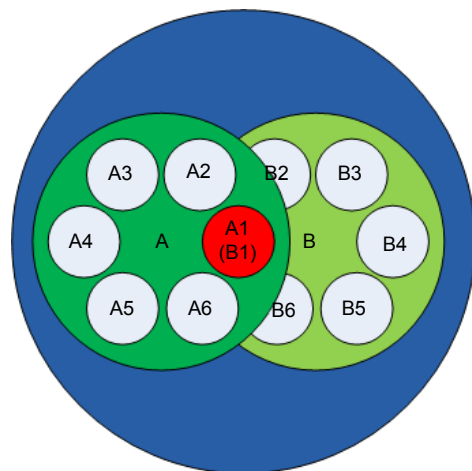


图 4 CLST 标定转盘结构示意图  
Fig. 4 Structure diagram of CLST calibration rotator



B2 中，波片的快轴方位角由电机 Drive B1 驱动旋转。各驱动电机的性能要求如表 5 所示。

如图 5 所示，转盘 Wheel A 和转盘 Wheel B 将封装在一个圆筒形结构体内，并安装在 CLST 系统 F2 焦

平面处。转盘 Wheel B 将位于 F2 焦平面上，利于使用针孔、分辨率板等器件对系统进行校准。转盘中其它通光孔计划装备其它设备，用于望远镜系统装校。各通光孔设备的作用如表 6 所示。

表 5 驱动电机性能要求

Table 5 Requirements for motor drives

	Drive A	Drive A1	Drive B	Drive B1
Position precision/(°)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Position repeatability/(°)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rotation speed/(rpm)	>3	>10	>3	>10

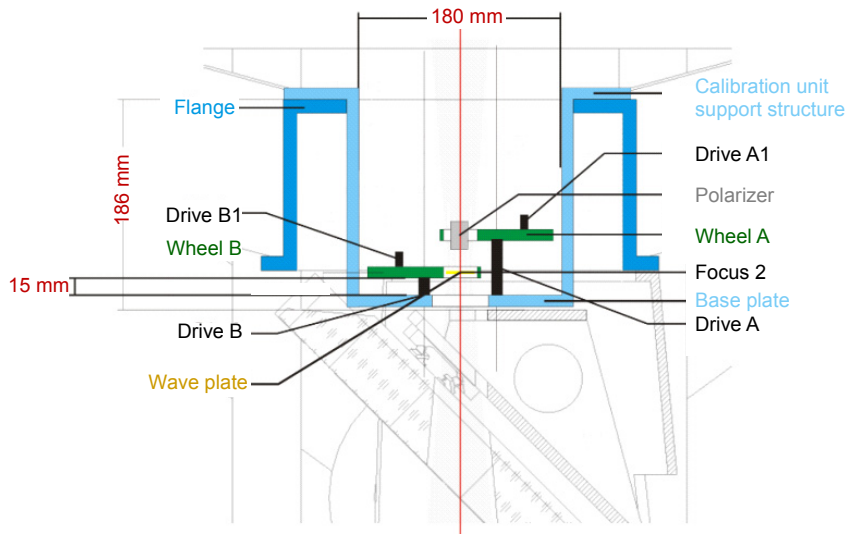


图 5 CLST 标定单元封装结构示意图

Fig. 5 Configuration diagram of CLST calibration unit

表 6 转盘各通光孔装置及应用

Table 6 The device and their useful on the rotator

	Device	Application
A1	Rotating polarizer 1	To introduce linear polarization In visible wavelength
A2	Rotating polarizer 2	To introduce linear polarization In near infrared wavelength
A3	Full FOV	
A4	Fiber adapter	Holder for a fiber
A5	Empty	For later use
A6	Empty	For later use
B1	$\lambda/4$ wave plate 1	To introduce circular polarization In visible wavelength
B2	$\lambda/4$ wave plate 1	To introduce circular polarization In near infrared wavelength
B3	Full FOV	
B4	Pinhole	To align the wave front sensor and so on
B5	Resolution target	Used for focusing M3
B6	Slanted edge target	To measure directly the MTF

CLST 偏振调制选择旋转偏振片和波片的方式, 当进行偏振标定时, 转盘 Wheel A 将偏振片切换进光路中, 并通过驱动器 Drive A1 调制偏振片的方位角, 同理, 转盘 Wheel B 将  $\lambda/4$  波片切换进光路中, 并通过驱动器 Drive B1 调制波片快轴方位角, 实现对入射光的调制。

## 5 结 论

本文分析了偏振标定的基本原理, 给出了 CLST 选择的标定方案(四点偏振标定法), 并为 CLST 太阳望远镜设计了基于旋转偏振片和  $\lambda/4$  波片的偏振标定结构。该偏振标定单元位于第二个焦点 F2 处, 可以实现对望远镜系统可见光和近红外波段仪器偏振标定。此外, 该标定单元的转盘各自预留了其它设备的接口, 可以用于光学系统其它参数的校准。

## 参考文献

- [1] Hofmann A, Rendtel J. Polarimetry with GREGOR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4843**: 112–121.
- [2] Beck C, Bellot Rubio L R, Kentischer T J, et al. Two-dimensional solar spectropolarimetry with the KIS/IAA Visible Imaging Polarimeter[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, **520**: A115.
- [3] Von Der Lühe O, Schmidt W, Soltan D, et al. GREGOR: a 1.5 m telescope for solar research[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2001, **322**(5–6): 353–360.
- [4] Cao W, Ahn K, Goode P R, et al. The new solar telescope in big bear: polarimetry II[C]//*Proceedings of ASP Conference*, 2011: 345–349.
- [5] Keil S L, Rimmele T R, Oschmann J, et al. Science goals and development of the advanced technology solar telescope[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2004, **2004(IAUS223)**: 581–588.
- [6] Matthews S A, Collados M, Mathioudakis M, et al. The European solar telescope (EST)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9908**: 990809.
- [7] Qu Z Q, Zhang X Y, Chen X K, et al. Solar spectroscopy telescope and the stokes spectrometry[J]. *Progress in Astronomy*, 2001, **19**(2): 139–140.
- [8] Fang C, Huang Y R. The solar tower telescope of Nanjing university and its multiple solar spectrograph[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1983, **24**(3): 189–195.
- [9] Xu F Y, Xu Z, Xu S C, et al. Installation/adjustment of a 6m near-infrared spectrograph for the 1m new vacuum solar telescope in the Fuxian-Lake solar-observation station and preliminary observation results of solar spectra around 1.56  $\mu\text{m}$  using the spectrograph[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2014, **11**(2): 168–175.
- [10] Yuan S. Polarization model for the new vacuum solar telescope[C]//*Proceedings of APS Conference*, 2014: 297.
- [11] Hofmann A. Polarimetry with GREGOR - an ongoing project[J]. *Sun and Geosphere*, 2007, **2**(1): 9–12.
- [12] Bettonvil F C M, Collados M, Feller A, et al. The polarization optics for the European Solar Telescope (EST)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7735**: 77356I.
- [13] Rao C H, Gu N T, Zhu L, et al. 1.8-m solar telescope in China: Chinese large solar telescope[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, **1**(2): 024001.
- [14] Azzam R M A, Masetti E, Elminyaw I M, et al. Construction, calibration, and testing of a four - detector photopolarimeter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, **59**(1): 84–88.
- [15] Krishnan S. Calibration, properties, and applications of the division-of-amplitude photopolarimeter at 632.8 and 1523 nm[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, **9**(9): 1615–1622.
- [16] Snik F. Calibration strategies for instrumental polarization at the  $10^{-5}$  level[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6269**: 62695P.
- [17] Hou J F. Studies and applications of polarimeter's polarization calibration with high precision[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [18] Almeida J S, Pillet V M. Instrumental polarization in the focal plane of telescopes[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, **260**(1–2): 543–555.

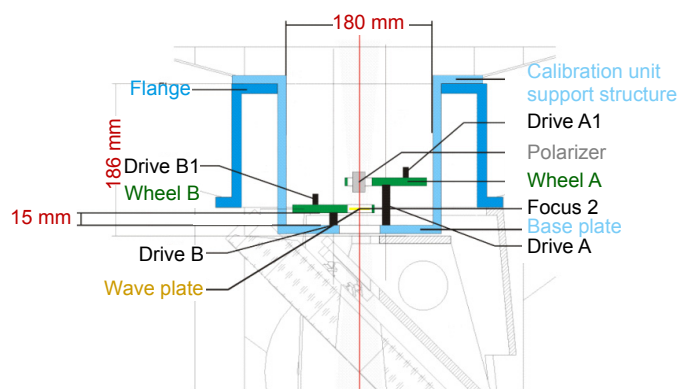
# Polarization calibration unit design of 1.8 m Chinese large solar telescope

Yao Benxi<sup>1,2,3</sup>, Rao Changhui<sup>1,2\*</sup>, Gu Naiting<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Configuration diagram of CLST calibration unit

**Overview:** Practically all solar phenomena are more or less relative to the solar magnetic field. It produces relatively stable structures like sunspots or prominences and is responsible for spectacular dynamic phenomena like flares or coronal mass ejections. However, the generation, amplification and destruction of magnetic fields remain poorly understood. The knowledge of its magnitude and direction is crucial for interpreting measurements of other parameters, and it can be measured usually by a polarimetry at some special spectral lines, which should be sensitive to the Zeeman effect. To answer what physical mechanisms are responsible for heating the corona, what causes variations of radiative output in the Sun, and what mechanisms trigger flares and coronal mass ejections and so on, many large aperture solar telescope have been developed (such as VTT, GREGOR, NST) or have being developed (such as DKIST, EST), and the Stokes polarimetry is their most important observational device for determining the magnetic field. The Chinese large solar telescope (CLST) with a 1.8-m aperture is a classic Gregorian configuration telescope with an alt-azimuth mount. It will be the second largest solar telescope in the world for a long time. And it is the main task for the Chinese large solar telescope (CLST) to measure the solar polarization with a high accuracy and sensitivity. However, as a classic Gregorian configuration telescope with an alt-azimuth mount, the telescope system itself will introduce instrumental polarization. And it also will change constantly with the rotating of the telescope. Therefore a calibration unit which produces light of known polarization states is necessary to measure the Muller matrix of the system and apply the correction numerically on the measured Stokes vector.

In this paper, we introduced the polarization calibration method and proposed a calibration progress. Since the telescope is rotational, symmetric down to M4, the position of the secondary focus F2 is appropriate for a calibration unit because the components before it do not contribute to the Muller matrix. F2 is an extremely useful position in CLST. It should be used not only for polarimetric purposes but also for internal alignment. Thus the calibration unit becomes a more versatile device. Then we design the structure of CLST calibration unit with two turnplates. The calibration unit optics equipped on these turnplates will consist of a rotatable linear polarizer, and two rotatable achromatic quarter wave plates which are in use alternatively for visual range or infrared observations. And there are also some other space on the turnplates to realize the internal alignment purposes.

**Citation:** Yao B X, Rao C H, Gu N T. Polarization calibration unit design of 1.8 m Chinese large solar telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(11): 180058

Supported by National Natural Science Foundation of China (11178004, 11727805)

\* E-mail: chrao@ioe.ac.cn