

# 快速可调谐 Lyot 滤光器研制及其在一米新真空太阳望远镜上观测

王希群<sup>1,2,3,4</sup>, 梁永军<sup>5</sup>, 张军平<sup>5</sup>, 吴佳佳<sup>5</sup>, 袁沐<sup>6</sup>, 付玉<sup>7</sup>, 吕卓<sup>1,2,3,4</sup>, 毛伟军<sup>5</sup>, 金振宇<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室, 云南 昆明 650011;

<sup>4</sup>云南省应用天文技术工程实验室, 云南 昆明 650011;

<sup>5</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

<sup>6</sup>中国科学院国家天文台, 北京 100101;

<sup>7</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100049

**摘要** Lyot 滤光器是太阳大气窄带成像观测的关键设备,用于太阳光球磁场测量和太阳色球成像观测。传统 Lyot 滤光器以波片旋转方式实现谱线扫描观测,谱线扫描速度慢,观测过程中不易消除湍流大气的影响。使用液晶相位可变延迟器替代旋转波片,可大幅提升滤光器谱线扫描速度。针对太阳光球磁场高分辨观测需求,研制了中心波长为 5324.19 Å 的液晶 Lyot 滤光器,该滤光器的透过率半宽为 0.1 Å,透过波长切换时间小于 100 ms。利用太阳光谱仪对该滤光器的谱线透过率轮廓进行了定标,并将其安装在云南天文台抚仙湖一米新真空太阳望远镜(NVST)上进行观测验证,获得了高分辨的太阳光球单色像及光球宁静区视向(LOS)速度场。光谱仪测试和 NVST 观测结果表明,该滤光器的谱线扫描速度和透过率半宽等参数满足 NVST 的太阳光球磁场和速度场高分辨率观测要求。

**关键词** 滤光器; 液晶; 太阳光谱; 多波长成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230676

## 1 引言

Lyot 滤光器是太阳成像观测研究中的关键设备<sup>[1]</sup>,通过对太阳大气的谱线进行多波长扫描观测,可以获得太阳大气的流场或磁场信息<sup>[2]</sup>。我国一米新真空太阳望远镜(NVST)利用 Lyot 滤光器在 656.28 nm 波段的 Ha 谱线进行高分辨成像观测,在太阳大气磁重联等研究领域获得了丰富的研究成果<sup>[3]</sup>。美国太阳动力学天文台(SDO)中的磁像仪以及我国 2022 年发射升空的先进天基太阳天文台(ASO-S)中的全日面磁像仪(FMG)均使用 Lyot 滤光器对太阳光球磁场进行观测<sup>[4-6]</sup>。为了获得太阳大气的速度场或磁场,需要采用谱线扫描方式观测相关谱线附近的光谱信息<sup>[7]</sup>。传统的 Lyot 滤光器谱线调制通过机械旋转各级的二分之一波片实现,该方法精度高,但旋转器件在硅油中运动速度受限,谱线调制通常需要 3~5 s<sup>[8]</sup>。液晶相位可变延迟器(LCVR)是一种基于液晶电控双折射特性的

偏振器件,其产生的相位延迟量受电压控制,响应速度较机械旋转方式更加快,光学响应时间小于 100 ms,因此利用液晶对 Lyot 滤光器透过带进行快速调制是一种有效的方式。

美国 Meadowlark Optics 公司于 1996 年提出利用 LCVR 制作可调谐滤光器以来<sup>[9]</sup>,意大利都灵天文台、日本京都大学飞弹天文台等<sup>[10-13]</sup>都研制了液晶可调谐滤光器(LCTF),用于太阳日冕和太阳色球观测。在国内也有多家科研机构开展了 LCTF 的研究工作:浙江大学研究团队<sup>[14]</sup>于 2009 年成功研制了多级 LCTF,其透过带半峰全宽(FWHM)为 8 nm;国家天文台侯俊峰等<sup>[15]</sup>在 2020 年成功研制了 FWHM 为 0.5 Å 的 LCTF,并开始试观测;中国科学院南京天文光学技术研究所张鹏斌等<sup>[16]</sup>在 2011 年提出可以利用 LCVR 对空间望远镜的 Lyot 滤光器的温度漂移进行补偿,以稳定透过率峰值波长。目前 LCTF 的 FWHM 最窄为 0.25 Å,可以用于太阳色球或日冕的谱线观测。

收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-04-23; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(11833010, 11773071)、云南省科技领军人才项目(202105AB160001)、云南省科技入滇项目(202003AD150019)

通信作者: \*kim@ynao.ac.cn

太阳光球磁场测量是基于塞曼效应开展的,它通过测量太阳光球磁敏谱线的偏振光谱并对其进行定量分析,结合太阳大气辐射转移模型来实现高精度磁场测量。用于太阳光球磁场测量的磁敏谱线宽度窄(通常在  $0.1\sim 0.3\text{ \AA}$  之间),因此要求滤光器具有极窄的透过带(通常 FWHM 在  $0.1\text{ \AA}$  以下)。极窄的透过带对滤光器的装调、标定及控制提出了更高的要求<sup>[17]</sup>。

为实现太阳光球磁场的高精度测量,本文研制了 FWHM 为  $0.1\text{ \AA}$  的极窄带液晶 Lyot 滤光器。首先介绍了滤光器的光学结构和电控系统,并对液晶 Lyot 滤光器的关键性能进行了测试,然后在 NVST 的窄带观测实验系统上进行试观测,成功获得了高分辨的光球图像,并使用多波长图像得到了多普勒速度场。

## 2 液晶 Lyot 滤光器设计

基于偏振干涉原理的 Lyot 滤光器通常由多级 Lyot 单元串联组成,且各 Lyot 单元的 FWHM 逐级翻倍。极窄带液晶 Lyot 滤光器由 6 个液晶 Lyot 单元串联组成,6 个 Lyot 单元的 FWHM 分别为  $0.1$ 、 $0.2$ 、

$0.4$ 、 $0.8$ 、 $1.6$ 、 $3.2$ 、 $6.4\text{ \AA}$ 。极窄带液晶 Lyot 滤光器的光学特性如表 1 所示。

表 1 滤光器特性

| Parameter                 | Value                          |
|---------------------------|--------------------------------|
| Center wavelength         | 532.419 nm                     |
| FWHM                      | 0.01 nm@532.419 nm             |
| Diameter                  | 40 mm                          |
| Free spectral range       | 0.5 nm                         |
| Wavelength switching time | $\leq 100\text{ ms}$           |
| Operating temperature     | $42\text{ }^\circ\text{C}$     |
| Temperature stability     | $< 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ |

### 2.1 光学设计

滤光器的光学结构如图 1 所示。每片偏振片、二分之一波片及双折射晶体按一定角度和顺序排列,并放置在恒温箱中。两端的玻璃封窗既可以保护光学元件,还能减少热量流失。FWHM 为  $0.1\text{ \AA}$  的 Lyot 单元对整体多级滤光器透过带轮廓影响最大,因此被放置在中间位置,以减小温度波动引起的中心波长漂移。

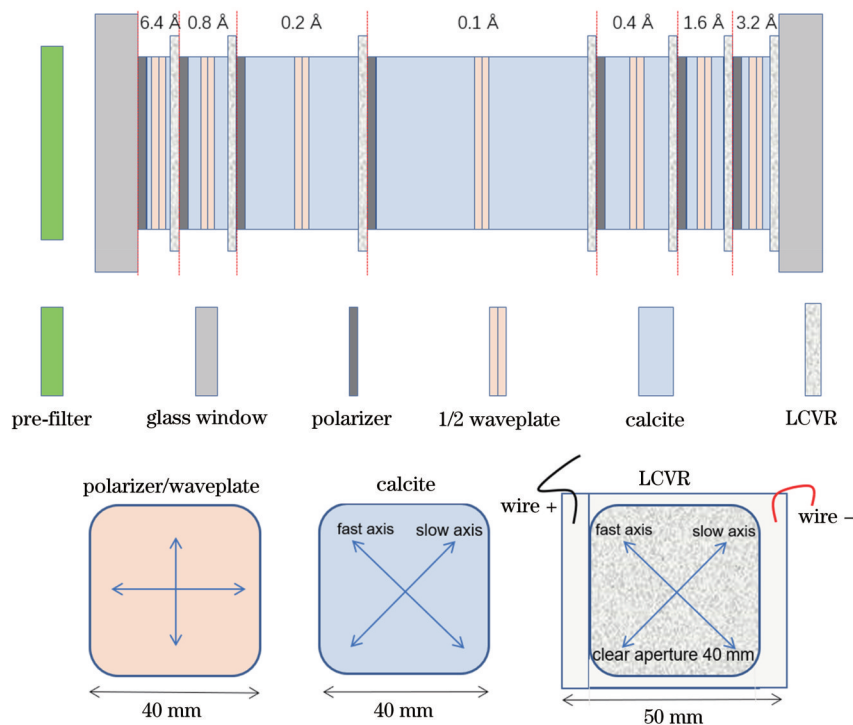


图 1 6 级窄带 Lyot 滤光器的光学结构

Fig. 1 Optical structure of 6-stage narrow-band Lyot filter

每级 Lyot 单元中都有两片双折射晶体及一片二分之一波片,这样可以一定程度上增大滤光器的视场。根据偏振干涉原理,在经过双折射晶体的光线中,寻常光及非寻常光会发生干涉。对于单级 Lyot 滤光器,假定入射光为自然光且光强为  $I_0$ ,经过滤光器后出射光表示为

$$I = 1/2 I_0 \cos^2(\delta_{C1} + \delta_{C2} + \delta_{LCVR}), \quad (1)$$

式中,  $\delta_{C1}$ 、 $\delta_{C2}$ 、 $\delta_{LCVR}$  分别为两块双折射晶体及 LCVR 产生的相位延迟量。当材料厚度和温度固定时,  $\delta_{C1}$ 、 $\delta_{C2}$  仅为波长的函数,  $\delta_{LCVR}$  为电压和波长的函数。多级液晶 Lyot 滤光器为多个单级液晶 Lyot 串联组成,  $n$  级透过带轮廓表示为

$$T = \prod_{i=1}^n \cos^2 \left[ \frac{\pi d_i (n_o - n_e)}{\lambda} + \delta_{\text{LCVR}}(V_i) \right], \quad (2)$$

式中:  $d$  为两块晶体厚度之和;  $\lambda$  为波长;  $n_o$ 、 $n_e$  为工作温度下双折射晶体 o 光及 e 光折射率;  $V_i$  为驱动电压。由式(2)可知, 晶体厚度  $d$  和双折射率决定了滤光器的透过带轮廓, 各级 LCVR 的驱动电压  $V_i$  决定了其相位。

由式(2)可计算得到  $\lambda_0$  附近透过带 FWHM, 即

$$F_{\text{FWHM}} = \frac{\lambda_0^2}{(n_o - n_e)d_n} Q, \quad (3)$$

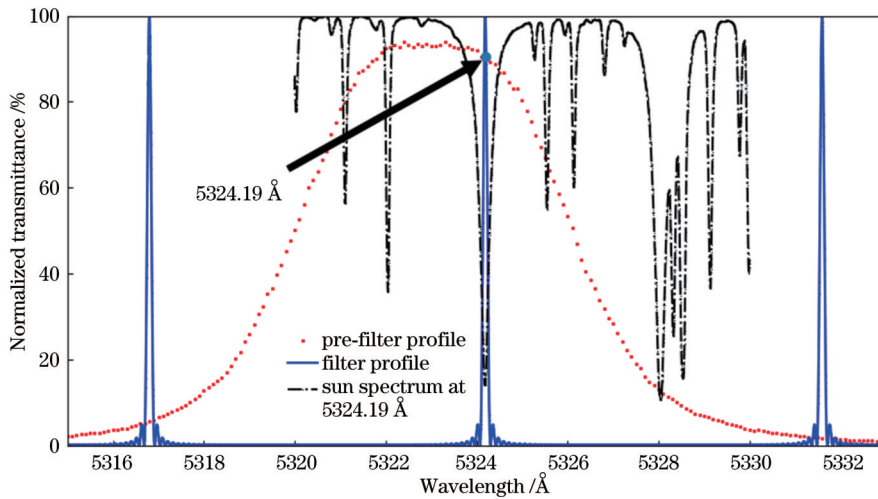


图2 前置滤光片及滤光器的归一化透过率

Fig. 2 Normalized transmittances of pre-filter and the filter

### 2.3 LCVR

基于 LCVR 的快速调谐 Lyot 滤光器利用向列液晶的电控双折射效应, 通过改变加在 LCVR 上的电压控制单级 Lyot 单元偏振片间的寻常光与非寻常光的相位延迟量, 进而控制单级 Lyot 滤光器的透过带中心波长。

滤光器各级 Lyot 单元的波长调节量  $\Delta\lambda$  与 LCVR 产生的延迟量  $\Delta\delta$  的关系表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{\pi d_0 (n_o - n_e)} \Delta\delta. \quad (4)$$

为实现 6 级 Lyot 单元的波长调节, 需要计算并向每片 LCVR 施加不同的驱动电压。因此, 每片 LCVR 的电压-延迟量响应曲线需要提前进行标定。

各级 Lyot 单元中使用的 LCVR 由美国 Meadowlark Optics 公司生产, 具体参数如表 2 所示。

6 级液晶 Lyot 滤光器的控制结构如图 3 所示, 由两台液晶控制器控制 6 片 LCVR。

## 3 液晶相位延迟器定标

液晶相位延迟器是一种多层结构的器件, 其表现出来的光学特性是内部大量液晶分子综合的结果。作

式中,  $Q$  为半宽色散改正因子, 通常取 0.886<sup>[18]</sup>。

根据滤光器 FWHM 设计要求, 选用冰洲石作为双折射晶体材料, 在 42 °C 工作温度下其双折射率为 0.17418, 利用式(3)可计算出各级双折射晶体的厚度。

### 2.2 前置滤光片

前置滤光片选用 Alluxa 生产的超窄带硬膜滤光片, FWHM 为 6 Å。前置滤光片、6 级 Lyot 滤光器透过带轮廓及 5324 Å 附近的太阳大气谱线如图 2 所示。前置滤光片在 5324 Å FeI 吸收线附近的透过率大于 80%, 且将滤光器其他级次透过带强度抑制在 10% 以下。

表 2 LCVR 特性

Table 2 Characteristics of LCVR

| Parameter                 | Value                     |
|---------------------------|---------------------------|
| Retarder material         | Nematic liquid crystal    |
| Operating wavelength      | 500 - 870 nm (uncoated)   |
| Retardance range          | 30 nm to 1λ@870 nm        |
| Wavefront distortion      | ≤λ/4                      |
| Retardance uniformity     | 2% RMS (root mean square) |
| Thickness                 | 10 mm                     |
| Clear aperture            | 40 mm                     |
| Transmissivity            | 95.5%                     |
| Speed of optical response | ≤100 ms                   |
| Voltage control range     | 0 - 10 V                  |

为一种电控偏振器件, LCVR 的快轴方位角和相位延迟量是该器件最重要的光学特性。由于 LCVR 在不同驱动电压下产生的相位延迟量是非线性的, 且制造商仅在一个波长下校准了使用的液晶, 因此有必要根据 LCVR 的实际工作温度和波长对其电压-延迟量特性进行精确标定。由于 LCVR 延迟量随驱动电压变化范围较大, 故选用 Mueller 矩阵光谱偏振仪对其光学特性进行测量<sup>[19]</sup>。



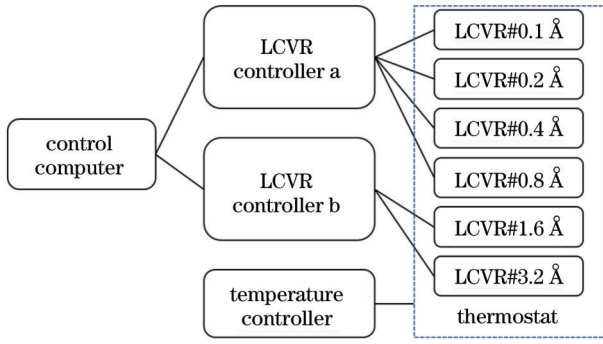


图 3 液晶 Lyot 滤光器的控制结构  
Fig. 3 Control structure of liquid crystal Lyot filter

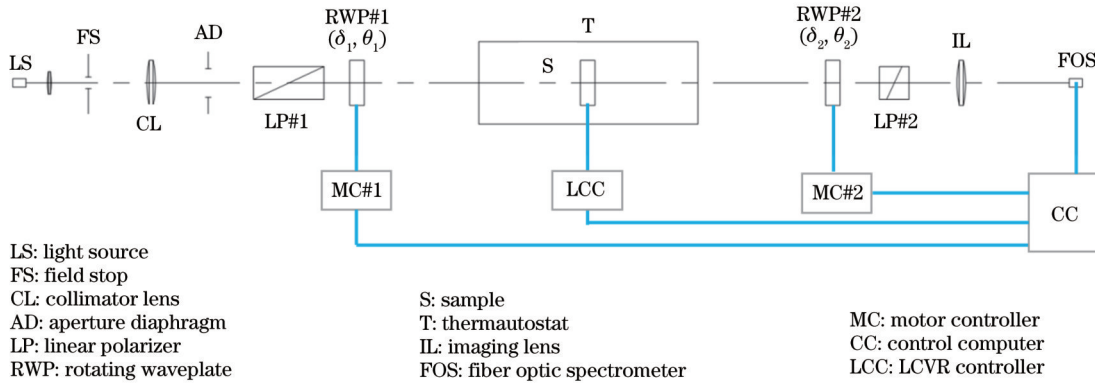


图 4 LCVR 测量系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the measurement system for LCVR

假定系统入射光为自然光且光强为  $I_0$ , 根据 Stokes 矢量法, 系统出射光表示为

$$I(\lambda, \theta_1, \delta_1, \theta_2, \delta_2) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] M_{LP1} M_{RWP1}(\lambda, \theta_1, \delta_1) M_S(\lambda) M_{RWP2}(\lambda, \theta_2, \delta_2) M_{LP2} [I_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (5)$$

式中:  $\theta_1, \theta_2$  分别为偏振发生器及偏振分析器中旋转波片的快轴方位角;  $\delta_1, \delta_2$  分别为偏振发生器及偏振分析器中旋转波片的相位延迟量;  $M_{LP}, M_{RWP}, M_S$  分别为系统中线偏振片、旋转波片及测试样品的 Mueller 矩阵, 分别表示为:

$$M_{LP} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$M_{RWP}(\theta, \delta) = M_S(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \cos \delta \sin^2(2\theta) & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta) & \sin \delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \delta \sin 2\theta & -\sin \delta \cos 2\theta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

通过高精度转台带动波片旋转, 改变其快轴方位角  $\theta_1, \theta_2$ , 光谱仪可获得不同光强。控制两个转台分别至 8 个不同位置, 即可获得 64 个  $\theta_1, \theta_2$  组合。光谱仪中获得 64 个光谱的序列后, 对于特定波长, 可利用最小二乘法优化出样品的 Mueller 矩阵。得到样品在各个波长及驱动电压下的 Mueller 矩阵后, 可由最小二乘法优化出式(8)中 LCVR 样品的相位延迟量  $\delta$  及快轴方位角  $\theta$  和驱动电压的关系曲线。532.4 nm 波长处的优化结果如图 5 所示。

### 3.1 LCVR 测量系统

LCVR 测量系统原理如图 4 所示。该系统由光源、偏振发生器、偏振分析器和光谱仪组成。偏振发生器由一个固定的线性偏振片和一个高精度的可旋转四分之一波片组成。偏振分析器由一个高精度的可旋转四分之一波片和固定的线性偏振片组成。Mueller 矩阵光谱偏振仪从光源到探测器依次是: 卤素光源、偏振片 LP#1、四分之一波片 RWP#1、待测样品、四分之一波片 RWP#2、偏振片 LP#2、光纤光谱仪。其中, RWP#1 和 RWP#2 分别安装在两个高精度电控转台上, 可以对波片角度  $\theta_1, \theta_2$  进行调节。

### 3.2 LCVR 实测结果

利用上述方法对 LCVR 样品的相位延迟量时间稳定性、空间均匀性及电控分辨率进行实测。测试结果表明, LCVR 的相位延迟量时间稳定性(24 h)符合正态分布, 标准差为  $0.0341^\circ$ , 峰谷值(PV)小于  $0.2^\circ$ 。LCVR 的空间均匀性(40 mm × 40 mm)实测结果如表 3 所示, 其中 P1~P7 为 LCVR 样品的不同空间位置。结果表明, LCVR 的空间均匀性 PV 值小于  $8.4^\circ$ 。液晶控制器电控分辨率为 1 mV, 对应的液晶延迟量调节步长为  $0.07^\circ$ 。

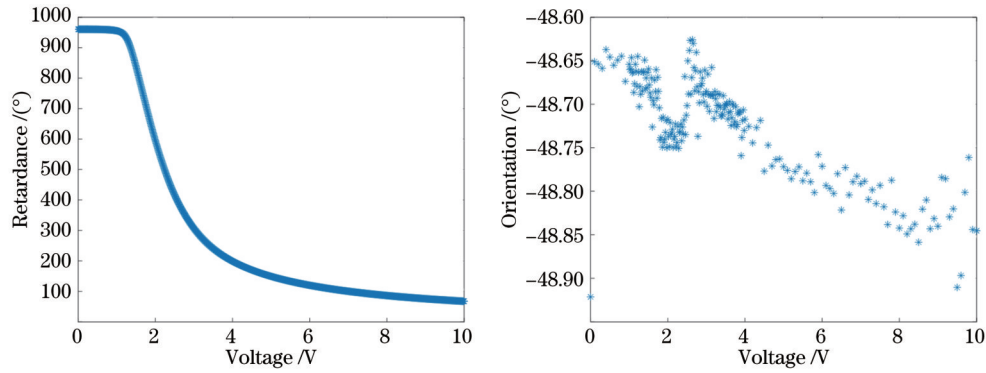


图 5 532.4 nm 波长处 LCVR 相位延迟量(左)及快轴方位角(右)  
Fig. 5 Retardance (left) and fast axis azimuth (right) of LCVR at 532.4 nm wavelength

表 3 LCVR 表面 7 个空间位置的延迟量

Table 3 Retardances of 7 spatial positions on LCVR surface

| Position | 2.0 V / (°) | 2.5 V / (°) | 3.0 V / (°) | 3.5 V / (°) | 4.0 V / (°) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| P1       | 72.010      | -65.097     | 216.038     | 169.518     | 140.258     |
| P2       | 72.444      | -64.601     | 216.693     | 170.128     | 140.747     |
| P3       | 80.347      | -59.421     | 219.927     | 172.468     | 142.525     |
| P4       | 75.352      | -62.711     | 217.830     | 170.949     | 141.347     |
| P5       | 73.229      | -63.963     | 217.041     | 170.380     | 140.989     |
| P6       | 77.243      | -61.490     | 218.690     | 171.654     | 141.943     |
| P7       | 73.268      | -64.103     | 216.954     | 170.282     | 140.870     |
| PV       | 8.337       | 5.676       | 3.889       | 2.950       | 2.267       |

LCVR 的光学响应速度是液晶 Lyot 滤光器波长切换速度的决定性因素。使用光电二极管及示波器可检测 LCVR 的光学响应速度,实测结果如图 6 所示。图 6 中:紫色信号为 LCVR 的控制电压;黄色曲线为光电二极管检测到的 LCVR 的光学响应;图 6(a)为控制

电压升高时的测量结果;图 6(b)为控制电压降低时的测量结果。使用示波器的测量功能测得 LCVR 的光学响应时间不超过 40 ms。考虑计算机控制软件中必要的延时,多级液晶 Lyot 滤光器的波长切换时间可小于 100 ms。

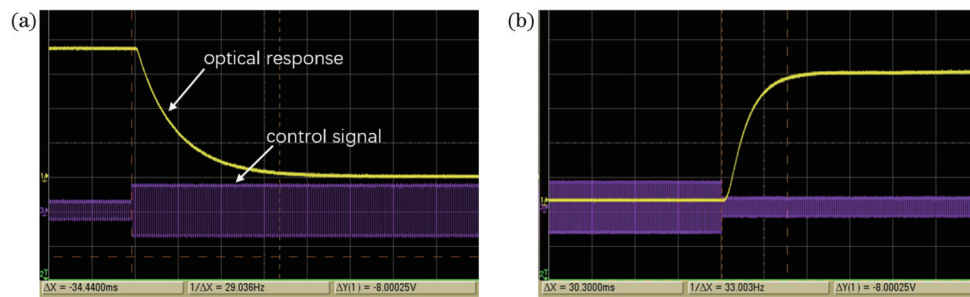


图 6 LCVR 的光学响应速度。(a)电压升高;(b)电压下降  
Fig. 6 Response speed of the LCVR. (a) Voltage raise; (b) voltage drop

### 4 液晶 Lyot 滤光器的波长定标

FWHM 为 0.1 Å 的液晶滤光器的光学装调及定标均在中国科学院南京天文光学技术研究所的太阳光谱实验室完成。使用七米太阳光谱仪可对各 Lyot 单元的透过带峰值进行对齐,并测定其 FWHM 及中心波长。光谱仪中的切换装置可切换白光光源及太阳光,关键参数如表 4 所示。光谱仪探测器采集的图像

及实测滤光器轮廓如图 7 所示。

#### 4.1 滤光器 FWHM

太阳光谱仪获得的滤光器透过带轮廓带有一定程度的仪器展宽,因此,实测的滤光器透过带 FWHM 较设计值更大。通过调整狭缝尺寸并测量不同狭缝尺寸下的滤光器透过带 FWHM,结合光栅光谱仪仪器展宽模型,即可验证滤光器真实 FWHM 与理论值的符合情况。

表 4 七米太阳光谱仪特性

Table 4 Characteristics of 7-meter solar spectrometer

| Parameter                    | Value         |
|------------------------------|---------------|
| Size of diffraction grating  | 10 mm × 10 mm |
| Grating linear density       | 600 g/mm      |
| Focal length of collimator   | 6000 mm       |
| Focal length of imaging lens | 7000 mm       |
| Entrance slit                | 0.1-0.2 mm    |

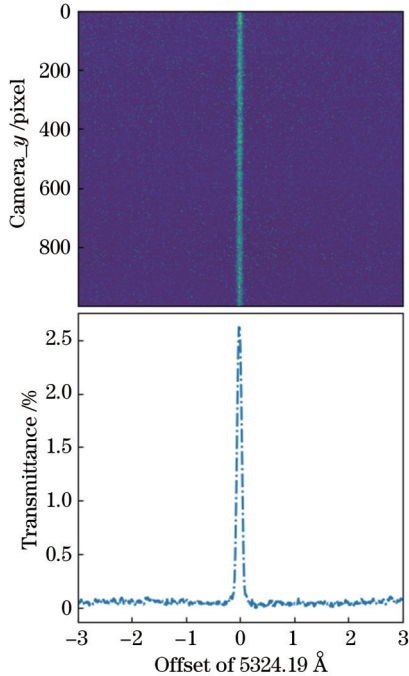


图 7 太阳光谱仪实测的滤光器透过带轮廓

Fig. 7 Measured filter transmission profile by solar spectrometer

光栅光谱仪的理论分辨率表示为

$$R_{SP} = \frac{wA}{sr}, \quad (8)$$

式中:  $w$  为狭缝宽度;  $A$  为系统放大率;  $s$  为探测器像元尺寸;  $r$  为探测器的光谱分辨率。

仪器对滤光器 FWHM 的展宽作用近似为几何平均关系, 表示为

$$F_{FWHM, SP} = \sqrt{R_{SP}^2 + F_{FWHM}^2}, \quad (9)$$

式中:  $F_{FWHM}$  为滤光器的理论 FWHM;  $F_{FWHM, SP}$  为滤光器经过仪器展宽后的 FWHM。

分别对不同宽度狭缝下的滤光器 FWHM 进行实测, 实测的 FWHM 与式(9)计算的理论 FWHM 的对比如图 8 所示。实测结果与理论计算结果一致性较好, 因此, 滤光器的实际 FWHM 符合设计需求。

#### 4.2 滤光器线心定标

控制各 Lyot 单元中的 LCVR 驱动电压, 即可将滤光器的透过带线心对齐至目标波长。

将太阳光谱仪的光源切换为太阳光, 根据光谱仪

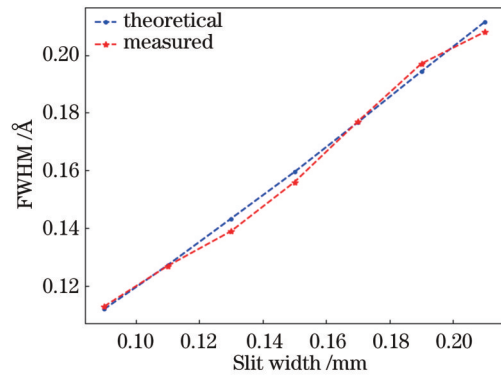


图 8 不同狭缝宽度下的理论及实测 FWHM

Fig. 8 Theoretical and measured FWHM under different slit widths

探测结果调整光谱仪的光栅角度, 将目标谱线线心 ( $5324.19 \text{ \AA}$ ) 调整到探测器  $x$  轴中间位置。根据邻近特征谱线的波长位置, 计算出探测器的光谱分辨率为  $0.0063 \text{ \AA/pixel}$ , 进而对探测器  $x$  轴进行标定。逐级调整 Lyot 单元中的 LCVR, 将各级滤光器透过带峰值对齐至目标波长, 结果如图 9 所示。经过光谱仪实测可知, 该多级 Lyot 滤光器的峰值透过率为  $2.62\%$ 。

滤光器线心定标过后, 利用式(4)计算各单元波长切换所需的相位延迟量, 进而从定标过的 LCVR 电压-延迟量结果中查询所需的驱动电压。

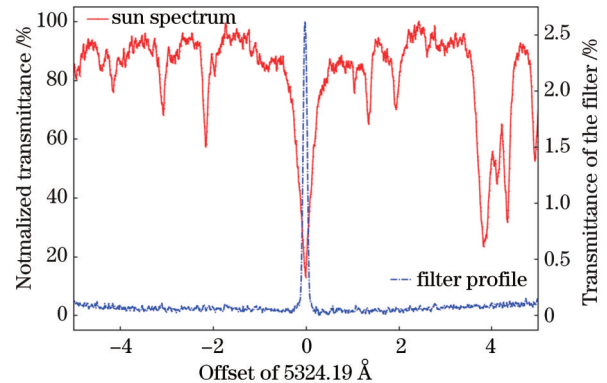


图 9 太阳光谱仪实测的  $5324 \text{ \AA}$  光谱及滤光器轮廓

Fig. 9 Measured  $5324 \text{ \AA}$  spectrum and filter profile by solar spectrometer

## 5 液晶 Lyot 滤光器观测验证

NVST 是我国最重要的地基太阳观测设备。基于研制的液晶 Lyot 滤光器, 在 NVST 仪器平台搭建了太阳光球窄带观测系统, 并进行观测验证。通过快速采集多波长数据, 可获得高时间分辨率的单色像, 进而计算得到高时间分辨率的多普勒速度场等信息。

### 5.1 NVST 太阳光球窄带观测实验系统

高分辨太阳光球观测实验系统安装在 NVST Coude 仪器平台上, 光学配置如图 10 所示。



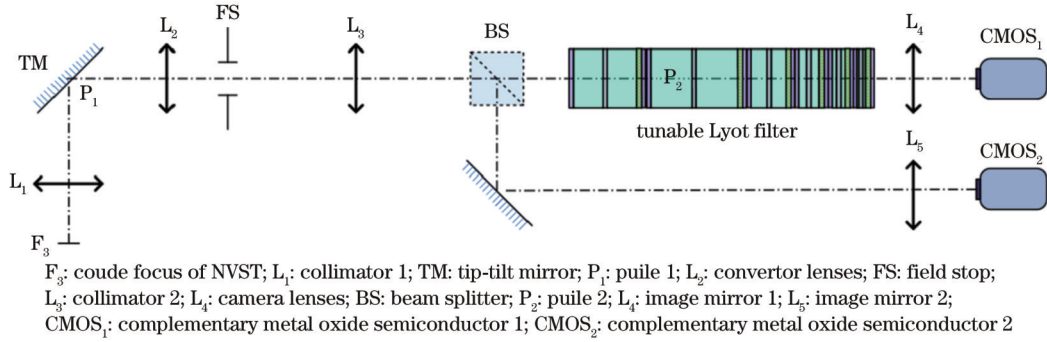


图 10 测试系统光学配置

Fig. 10 Setup of the experimental system

NVST Coude 的焦点  $F_3$  处可切入切出视场定标单元,进行两通道探测器视场定标及齐焦调节。分光镜控制窄带通道光强与宽带通道光强比为 9:1,放置合适参数的减光片,以保证两个通道的曝光时间接近。Lyot 滤光器放置在准直光路中,透过带 FWHM 最窄的级次放置在瞳面位置。两台探测器通过同步采集控制系统实现  $\mu\text{s}$  量级同步采集<sup>[20]</sup>,以保证每帧采集的窄带图像强度可以被准确校正。详细系统参数如表 5 所示。

### 5.2 滤光器光学像质测试

太阳大气高分辨观测对滤光器的光学像质提出了

表 5 测试系统关键参数

Table 5 Key parameters of the experimental system

| Parameter                                  | Value           |
|--|-----------------|
| Pixel resolution of narrow-band channel    | 0.0497"         |
| Pixel resolution of broadband channel      | 0.0279"         |
| FOV (field of view) of narrow-band channel | 101.87"         |
| FOV of broadband channel                   | 57.12"          |
| Exposure time                              | 20 - 50 ms      |
| Synchronization accuracy                   | 1 $\mu\text{s}$ |
| Synchronous acquisition frame rate         | 30 frame/s      |

较高的要求,即观测系统的光学分辨率需要优于望远镜的衍射极限。

使用鉴别率板对滤光器的光学像质进行测试是一种简便且直观的方法。该方法无须改变观测系统的光路结构即可对整个观测系统的光学像质进行评价,直接反映了实际观测情况。

将 GBA3 鉴别率板(国标)放置在 NVST  $F_3$  处,当液晶滤光器未置入光路时,窄带通道探测器拍摄到鉴别率板上的线对结果如图 11(a)所示,可分辨的鉴别率板单元号为 20,通过查表可知,该组中的线宽为  $13.3 \mu\text{m}$ 。将滤光器置入光路,探测器拍摄到的图像如图 11(b)所示,与无滤光器时相比,成像质量发生劣化,且对比度下降,可分辨的鉴别率板单元号为 16,该组中的线宽为  $16.8 \mu\text{m}$ 。系统分辨率的计算公式为

$$r = \frac{l}{f}, \quad (10)$$

式中,  $l, f$  分别为可分辨的线宽及系统等效焦距。NVST 太阳窄带观测实验系统的等效焦距为 26969 mm,有无滤光器时实验系统的分辨率分别为 0.1284" 和 0.1072"。NVST 衍射极限分辨率为 0.1356",因此该液晶滤光器的光学像质能够满足 NVST 衍射极限成像需求。

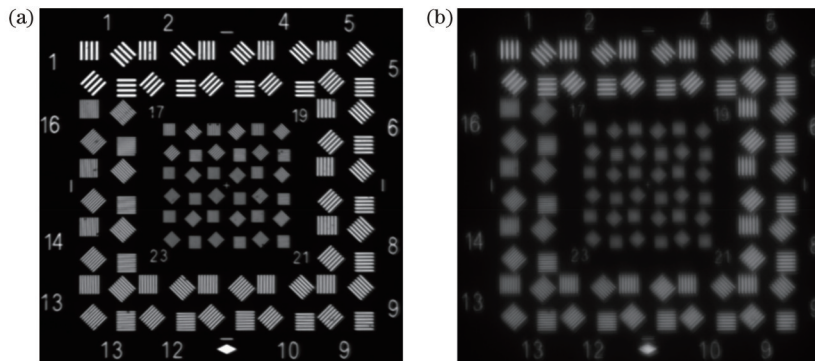


图 11 有无滤光器时的鉴别率板图像。(a)无滤光器;(b)有滤光器

Fig. 11 Resolution target images with and without the filter. (a) Without the filter; (b) with the filter

### 5.3 多波长成像

通过观测太阳大气谱线的不同位置可以获得不同

信息。通过 NVST 太阳光球窄带观测实验系统对太阳活动区 5324.19 Å FeI 线附近进行多波长观测,线心

图像如图 12(a) 所示, 此处光球米粒及暗径对比度稍低, 且可以观测到部分磁亮点。这是因为谱线受到磁场影响发生一定程度的分裂, 使得线心处的光强值较

周围更大。图 12(b) 为线翼  $0.3 \text{ \AA}$  处的图像, 此处特征更接近宽带光球图像, 与 G-band ( $4300 \text{ \AA}$ ) 或 TiO ( $7058 \text{ \AA}$ ) 类似。

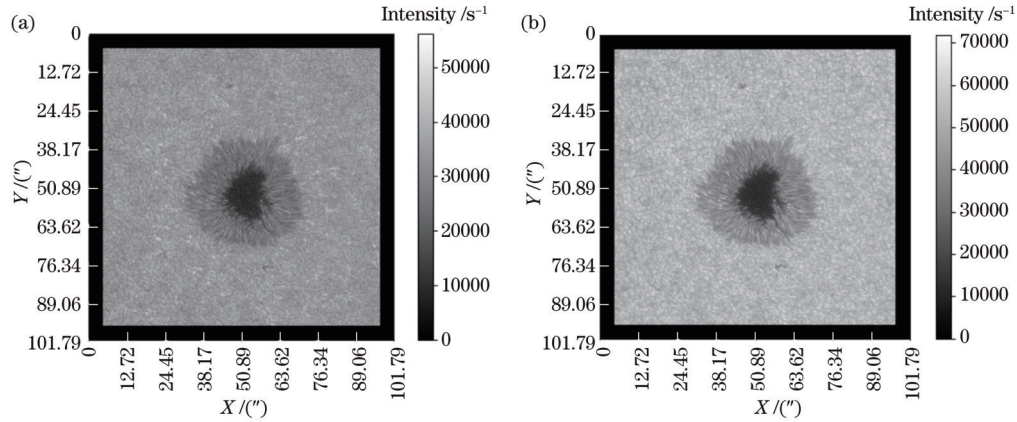


图 12 在  $5324.19 \text{ \AA}$  处的太阳光球滤光图像。(a) 线心; (b) 线翼  $0.3 \text{ \AA}$  单色像

Fig. 12 Filtergrams of solar photosphere at  $5324.19 \text{ \AA}$ . (a) Line center; (b)  $0.3 \text{ \AA}$  line wing monochromatic image

#### 5.4 太阳光球宁静区视向速度场

得益于液晶 Lyot 滤光器的高速波长切换能力, 在较短的时间内即可获得多波长图像数据。使用窄带滤光器进行波长扫描成像观测, 每个视场都可获得一条光谱轮廓。通过光谱轮廓可计算 Doppler 速度, 配合偏振分析器进行调制, 也可反演太阳大气磁场。

基于高分辨太阳光球观测实验系统, 在 2022-09-27 UTC01:27 对美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 设定的编号为 13110 的活动区进行了观测。每个波长

连续采集 10 帧图像, 图像曝光时间为  $40 \text{ ms}$ , 加上图像保存时间及必要的软件延时,  $10 \text{ s}$  内获得了 10 个波长数据。首先使用 100 帧数据计算观测区域的视向速度, 然后使用全视场系统频率漂移的在线测量方法测得系统的全视场频率漂移, 最后对全视场视向速度结果进行频率漂移校正<sup>[21-22]</sup>。比对 NVST 实测结果与 SDO 卫星上的日震及磁成像仪 (HMI) 同时刻观测结果, 如图 13 所示。

图 13(a)、(b) 分别为 NVST 及 HMI 观测到的太阳

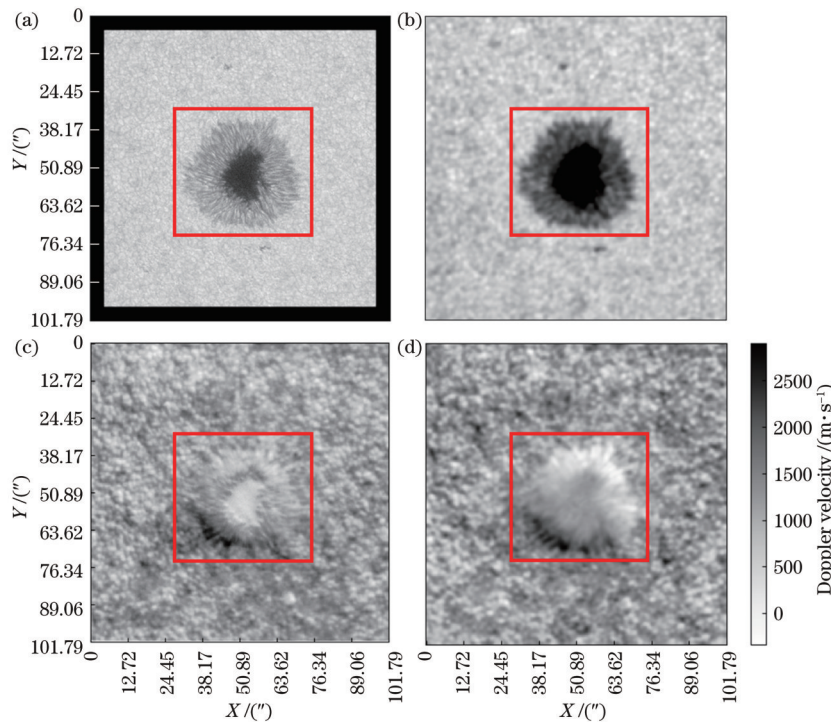


图 13 实测视向速度与 HMI 结果对比。(a) NVST 观测的太阳光球图像; (b) HMI 观测的太阳光球图像; (c) NVST 视向速度场; (d) HMI 视向速度场

Fig. 13 Comparison of measured line of sight velocity and HMI results. (a) Solar photosphere image observed by NVST; (b) solar photosphere image observed by HMI; (c) line of sight velocity field of NVST; (d) line of sight velocity field of HMI



光球图像,可以看出,NVST观测数据经过高分辨图像重建后有更高的空间分辨率。图 13(c)、(d)分别为 UTC01:27 时刻的太阳光球视向速度场,其中:红色方框标记以外的区域为宁静区,此处 NVST Doppler 速度计算结果与 HMI 的结果一致;红色方框标记以内的区域为活动区,磁场较强,磁敏谱线会发生不同程度的变形,仅使用高斯函数拟合方式计算谱线偏移存在较大误差,此处的 NVST Doppler 速度计算结果与 HMI 结果差异较大。因此今后观测太阳活动区时需要配合偏振分析器,使用磁场测量模型对视向速度场进行计算。

## 6 结 论

成功研制了用于太阳光球磁场测量的 6 级液晶 Lyot 滤光器。经实测,滤光器的 FWHM 为  $0.1 \text{ \AA}$ ,中心波长为  $5324.19 \text{ \AA}$ ,波长切换速度小于  $100 \text{ ms}$ 。

基于窄带滤光器,在 NVST 搭建了太阳光球窄带观测系统,在 2022-09-27 UTC01:27 对 NOAA 编号为 13110 的活动区进行了观测验证。观测验证结果显示,该液晶滤光器的光学像质能够满足 NVST 衍射极限成像需求。通过高速多波长观测,获得了太阳光球多波长单色像及视向速度场,并与 SDO 卫星上 HMI 同时刻结果进行了比对。对比结果显示:NVST 获得的单色像较 HMI 观测结果拥有更高的空间分辨率;NVST 获得的视向速度在宁静区与 HMI 观测结果一致。试观测结果表明,该滤光器的谱线扫描速度和透过率半宽等参数满足 NVST 的太阳光球磁场和速度场高分辨率观测要求。

该滤光器使用的前置滤光片为 Alluxa 公司销售的现货,中心波长为  $5323 \text{ \AA}$ ,较观测目标波长蓝移  $1 \text{ \AA}$  左右。滤光器偏带设置过大时,次级透过带有泄漏的风险,此后考虑定制一片中心波长为  $5324.19 \text{ \AA}$  的前置滤光片,FWHM 控制在  $5 \text{ \AA}$  以内。当前滤光器的峰值透过率为  $2.62\%$ ,若将各级 Lyot 单元中的偏振片替换为更高透过率的偏振片,可提高滤光器的峰值透过率。

## 参 考 文 献

- [1] Evans J W. The birefringent filter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(3): 229.
- [2] 王远方舟,金振宇,王希群,等.窄带可调谐滤光器在太阳磁场测量中的应用[J].科学通报,2023,68(15):1927-1940.  
Wang Y F Z, Jin Z Y, Wang X Q, et al. Application of the tunable narrowband filter in measurements of solar magnetic fields[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1927-1940.
- [3] Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6): 705-718.
- [4] Scherrer P H, Schou J, Bush R I, et al. The helioseismic and magnetic imager (HMI) investigation for the solar dynamics observatory (SDO)[J]. Solar Physics, 2012, 275(1/2): 207-227.
- [5] Couvidat S, Schou J, Hoeksema J T, et al. Observables processing for the helioseismic and magnetic imager instrument on the solar dynamics observatory[J]. Solar Physics, 2016, 291(7): 1887-1938.
- [6] Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al. Design of the full-disk MagnetoGraph (FMG) onboard the ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 157-169.
- [7] 艾国祥,胡岳风.太阳磁场望远镜的工作原理[J].天文学报,1986,27(2):173-180.  
Ai G X, Hu Y F. On principle of solar magnetic field telescope [J]. Acta Astronomica Sinica, 1986, 27(2): 173-180.
- [8] 艾国祥,胡岳风,李挺,等.用于太阳向量磁场和视向速度场测量的双折射滤光器[J].中国科学:数学,1984,14(6):540-548.  
Ai G X, Hu Y F, Li T, et al. Birefringent filter for measuring solar vector magnetic field and apparent velocity field[J]. Scientia Sinica: Mathematica, 1984, 14(6): 540-548.
- [9] Kopp G A. Tunable birefringent filters using liquid crystal variable retarders[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2265: 193-201.
- [10] Kado S, Suzuki H, Kuwahara Y, et al. Application of the liquid-crystal-based tunable Lyot filter to the optical emission imaging plasma spectrometry[J]. Plasma and Fusion Research, 2007, 2(2): S1125.
- [11] Fineschi S, Capobianco G, Massone G, et al. Liquid crystals Lyot filter for solar coronagraphy[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8148: 814808.
- [12] Hagino M, Ichimoto K, Kimura G, et al. Development of a universal tunable filter for future solar observations[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9151: 91515V.
- [13] Kopp G A, Derks M J, Elmore D F, et al. Tunable liquid-crystal filter for solar imaging at the He I 1083-nm line[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 291-296.
- [14] 杨国伟,郑臻荣,陈晓西,等.多级 Lyot 型液晶可调谐滤光片的研究[J].浙江大学学报(工学版),2009,43(6):1163-1167.  
Yang G W, Zheng Z R, Chen X X, et al. Study of multiple-stage Lyot liquid crystal tunable filter[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(6): 1163-1167.
- [15] 侯俊峰,邓元勇,王东光,等.液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望[J].航天器环境工程,2021,38(3):296-304.  
Hou J F, Deng Y Y, Wang D G, et al. Application and prospect of liquid crystal modulation technology in solar magnetic field detection[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(3): 296-304.
- [16] 张鹏斌,毛伟军.空间双折射干涉滤光器的主动补偿研究[J].应用光学,2011,32(6):1093-1097.  
Zhang P B, Mao W J. Active compensation research of spatial birefringent filter[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1093-1097.
- [17] Mudge J, Tarbell T. *In situ* calibration of tunable filters: Lyot and Michelson[J]. Applied Optics, 2014, 53(22): 4978-4986.
- [18] 艾国祥.双折射滤光器及其在天文学中的应用[J].天文学进展,1987,5(4):317-329.  
Ai G X. Birefringent filter and its application to astronomy[J]. Progress in Astronomy, 1987, 5(4): 317-329.
- [19] Ichimoto K, Shinoda K, Yamamoto T, et al. Photopolarimetric measurement system of Mueller matrix with dual rotating waveplates[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2006, 9: 11-19.
- [20] 王希群,陈宇超,柳光乾.基于 KD\*P 偏振调制和同程异构的图像同步采集时序控制[J].天文研究与技术,2018,15(4):413-422.  
Wang X Q, Chen Y C, Liu G Q. Timing sequence control based on KD\*P polarization modulation and the image synchronization acquisition for different structure of optical path [J]. Astronomical Research & Technology, 2018, 15(4): 413-422.
- [21] Title A M, Rosenberg W J. Improvements in birefringent filters 5: field of view effects[J]. Applied Optics, 1979, 18(20): 3443-3456.

- [22] 王希群, 吕卓, 王远方舟, 等. 基于里奥滤波器的太阳窄带观测系统全视场频率漂移高精度测量方法[J]. 光子学报, 2023, 52(5): 0552207.  
Wang X Q, Lü Z, Wang Y F Z, et al. High precision

measurement method of wavelength drift in full field of view for solar narrow band observation system based on Lyot filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5): 0552207.

## Development of Rapid Tunable Lyot Filter and Its Observation on 1 m New Vacuum Solar Telescope

Wang Xiquan<sup>1,2,3,4</sup>, Liang Yongjun<sup>5</sup>, Zhang Junping<sup>5</sup>, Wu Jiajia<sup>5</sup>, Yuan Shu<sup>6</sup>, Fu Yu<sup>7</sup>,  
Lü Zhuo<sup>1,2,3,4</sup>, Mao Weijun<sup>5</sup>, Jin Zhenyu<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, Yunnan, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Yunnan Key Laboratory of Solar Physics and Space Exploration, Kunming 650011, Yunnan, China;

<sup>4</sup>Engineering Laboratory on Applied Astronomy of Yunnan, Kunming 650011, Yunnan, China;

<sup>5</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;

<sup>6</sup>National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>7</sup>Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** The Lyot filter is a key device for narrow-band imaging observations of the solar atmosphere, and is widely employed for solar photospheric magnetic field measurements and solar chromospheric imaging observations. The mechanically rotating waveplate speed is around 3–5 s, and the long wavelength switching speed limits the solar atmospheric observation efficiency. If rapid wavelength tuning can be achieved, the effect of turbulent atmosphere on the signal can be somewhat eliminated by smoothing multiple sets of data. The liquid crystal variable retarder is an electronically controlled polarization element, and its utilization for phase instead of rotating waveplates can significantly increase the speed of filter spectral line scanning. There are successful examples of adopting liquid crystals to adjust the transmission band wavelength of Lyot filters. However, the spectral line widths of magnetically sensitive spectral lines leveraged for solar photospheric magnetic field measurements are narrow, typically between 0.1 Å and 0.3 Å. Therefore, a very narrow transmitting band is required for the filter, usually with a FWHM below 0.1 Å. The extremely narrow transmission band puts forward higher demands for the installation, calibration, and control of the filter. Thus, we propose to develop an extremely narrow FWHM liquid crystal filter for solar magnetic field measurements.

**Methods** We present the development, calibration, and observation verification of a multi-stage liquid crystal Lyot filter with an FWHM of 0.1 Å. First, the optical and electrical control design of the filter is shown. The filter consists of multiple polarizing elements and liquid crystals. Second, the characteristics of the liquid crystal variable retarder are tested by a Mueller matrix spectrometer. The Mueller matrix of the test sample is first obtained, and then the phase retardation and fast axis azimuth parameters are estimated. The time stability, spatial uniformity, and electrical resolution of the liquid crystal variable retarder in the filter are obtained. Then, the filter wavelength is calibrated by a high-resolution solar spectrometer. The FWHM of the filter is measured and the central wavelength of the filter is aligned to the target position. Finally, the liquid crystal filter is placed on the NVST experimental platform for observation and verification. The optical image quality of the filter is measured by a test target, and a clear monochromatic image of the solar photosphere is obtained by fast multi-wavelength observation. The Doppler velocity is calculated by the multi-wavelength monochromatic image.

**Results and Discussions** The filter FWHM is measured to be 0.1 Å with a central wavelength of 5324.19 Å (Fig. 9), and the filter wavelength switching speed is less than 100 ms (Fig. 6). The filter optical image quality meets the imaging requirements of NVST diffraction limit in the NVST solar photospheric narrow-band observation system. The resolution of the liquid crystal filter-based solar narrow-band observation system can reach 0.1284" (Fig. 11). Different atmospheric structures can be found in monochromatic images of different wavelengths of the solar photosphere (Fig. 12). Doppler velocities are calculated using multi-wavelength images, which agree with the HMI results in the quiet region (Fig. 13).

The filter employs a pre-filter with a  $1 \text{ \AA}$  blue shift in the central wavelength compared to the target wavelength, and there is leakage risk in the secondary transmission band under the too large offset band. The peak transmittance of the filter can be improved by replacing the polarizer in the Lyot unit at each level with a polarizer with higher transmittance.

**Conclusions** We develop a six-stage liquid crystal Lyot filter for solar photospheric magnetic field measurements. This filter has a higher wavelength tuning speed than the conventional filters. The filter has an FWHM of  $0.1 \text{ \AA}$  and can be adopted for scanning observations of the magnetically sensitive spectral lines of the sun's photosphere. The instrumental performance of the liquid crystal filter is verified by observations in the NVST solar photospheric narrow-band observation system. Multi-wavelength high-resolution monochrome images are obtained efficiently. The high-quality image data can be leveraged for quantitative calculation of Doppler velocity and other physical parameters. The measured results show that the spectral line scan speed of the filter is greatly improved compared with that of the conventional filters, and the transmittance half-width and other parameters meet the design requirements. The filter performance has significant features and performance advantages over the conventional filters and meets the high-resolution observation requirements of the solar photospheric magnetic and velocity fields of NVST.

**Key words** filter; liquid crystal; solar spectrum; multi-wavelength imaging