

文章编号 1004-924X(2026)17-2700-09

可调谐液晶双折射滤光器透射轮廓的 超窄带激光标定

王哲楷^{1,2}, 沈宇樑¹, 高碧源¹, 杨景杰^{1,2}, 白 阳¹, 佟立越¹,
孙英姿^{1,2}, 孙文君¹, 侯俊峰^{1,2*}, 王东光^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要:可调谐液晶双折射滤光器透射轮廓的精准标定是太阳望远镜实现精确磁场和速度场测量的基本前提,传统方法光谱分辨率低、难以适配整机标定,而且稳定性差、成本高。为此,提出一种基于超窄带固定波长连续激光的定标方法,利用单频连续激光的窄线宽、低噪声及高稳定特性,构建简捷高效的系统级方案。通过系统分析激光定标原理,理论证明超窄带激光可有效隔绝多级单元间的相位串扰,有效实现中心波长校准和透射轮廓标定。在此基础上,研制了激光定标系统,并与传统高分辨光谱仪定标方法做了对比实测分析。结果表明,激光定标方法实测滤光器透射轮廓与端到端仿真结果具备高度一致性,旁带轮廓显著优于传统方法,可实现对日观测并获得滤光器扫描的太阳特征谱线。该方法已应用于太阳极轨天文台磁场与速度场成像仪鉴定件滤光器的透射轮廓定标任务,同时可为各类型窄带可调谐滤光器的高精度定标提供通用性思路与实践参考。

关键词:超窄带激光;滤光器;透射轮廓;太阳望远镜;定标

中图分类号:O436 文献标识码:A

doi:10.3724/OPE.20263417.2700 CSTR:32169.14.OPE.20263417.2700

Ultra-narrowband laser calibration of transmission profile for tunable liquid crystal birefringent filters

WANG Zhekai^{1,2}, SHEN Yuliang¹, GAO Biyuan¹, YANG Jingjie^{1,2}, BAI Yang¹, TONG Liyue¹,
SUN Yingzi^{1,2}, SUN Wenjun¹, HOU Junfeng^{1,2*}, WANG Dongguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: jfhou@bao.ac.cn

Abstract: Accurate calibration of the transmission profiles of tunable liquid-crystal birefringent filters is es-

收稿日期:2026-06-11;修订日期:2026-07-10.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFF0503800, No. 2022YFF0503803);中国太空探源专项资助项目(No. GJ11020214);国家自然科学基金资助项目(No. 11773040, No. 11427901);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2022057)

essential for precise measurements of solar magnetic and velocity fields by solar telescopes. Conventional calibration methods are often constrained by limited spectral resolution and poor adaptability to system-level calibration or by inadequate stability and high cost. To overcome these limitations, a novel calibration method based on fixed-wavelength ultra-narrow-linewidth continuous-wave lasers is proposed. By exploiting the narrow linewidth, low noise, and high stability of single-frequency continuous-wave lasers, a concise and efficient system-level calibration scheme is established. The operating principle of the laser-based calibration method is systematically analyzed. Theoretical derivations demonstrate that ultra-narrowband lasers can effectively suppress phase crosstalk among multistage optical units, enabling accurate calibration of both the central wavelength and transmission profile. On this basis, a dedicated laser calibration system is developed, and comparative experiments are conducted against a conventional method based on high-resolution spectrometers. The experimentally measured transmission profiles obtained using the proposed method are in excellent agreement with end-to-end numerical simulation results, while the sideband profiles are substantially improved relative to those obtained using conventional approaches. In addition, solar characteristic spectral lines scanned by the filter are successfully acquired through on-sky observations. The proposed method has been applied to the transmission-profile calibration of prototype filters for the Magnetic and Helioseismic Imager (MHI) of the Solar Polar Orbit Observatory (SPO). It also provides a broadly applicable technical framework and practical reference for the high-precision calibration of various narrowband tunable filters.

Key words: ultra-narrowband laser; filter; transmission profile; solar telescope; calibration

1 引 言

太阳极区是调控太阳活动与空间天气的关键区域,也是太阳表面唯一未被正面成像探测的神秘地带。太阳磁活动周起源、高速太阳风起源及太阳系空间天气过程等重大科学难题,均因缺乏极区高精度探测数据而难以突破。我国太阳极轨天文台(Solar Polar-orbit Observatory, SPO)夸父二号是中国科学院太空探源专项系列科学卫星之一,计划于2029年1月发射,将首次实现对太阳极区的正面成像观测,为突破上述科学问题提供关键数据。其核心载荷磁场与速度场成像仪(Magnetic and Helioseismic Imager, MHI)承担着对光球矢量磁场与多普勒速度场的观测任务^[1-2]。可调谐液晶双折射滤光器作为MHI载荷的核心组件,依靠多级Lyot偏振干涉和液晶相位调制实现亚埃米级滤光和调谐^[3-6],其透射轮廓标定精度直接影响科学数据反演的可靠度^[7]。

传统滤光器透射轮廓标定多采用太阳光或卤素灯结合高分辨光谱仪实现^[8-11],但存在明显不足:一是双折射滤光器带宽仅约0.01 nm,要

求光谱仪分辨本领达到 $10^5 \sim 10^6$,而常规设备难以满足,导致实测结果通常为光谱仪与滤光器轮廓的卷积,很难获取滤光器的准确透射轮廓;二是滤光器集成至载荷系统(带探测器)后,高分辨光谱仪无法再作为终端检测设备接入光路,无法实现整机系统级透射轮廓标定。美国太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)的日震与磁成像仪(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI),我国先进天基太阳天文台ASO-S(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)夸父一号的全日面矢量磁像仪(Full-disk vector MagnetoGraph, FMG)曾采用可调谐染料激光器进行系统级定标^[12-13],但该类激光器为脉冲输出,功率稳定性差,且成本高、适配性有限。因此,发展高精度、高效率、可适配系统级集成的透射轮廓定标方法,对MHI载荷全过程检测与SPO卫星科学目标实现具有重要工程与科学价值。

本文提出一种基于超窄带固定波长连续激光的滤光器透射轮廓定标方法,利用单频连续激光超窄线宽、低噪声与高稳定的优势,构建简捷高效的高精度定标方案。通过建立定标理论模

型,搭建实验系统,滤光器透射轮廓标定与太阳谱线定标验证,并利用高分辨光谱仪评估滤光器调谐过程稳定性,为可调谐液晶双折射滤光器快速高精度标定提供新技术途径。本文方法可以推广至其他窄带可调谐滤光器的应用场景,为滤光器中心波长及透射轮廓的高精度标定提供通用性思路与技术参考。

2 基本原理与仿真

2.1 可调谐液晶双折射滤光器的工作原理

可调谐液晶双折射滤光器的工作原理如图 1 所示。该滤光器为 6 级 Lyot 单元^[14-15],各级滤光单元均依次由 0°方向偏振片、光轴 45°冰洲石晶

体、光轴 0°半波片、光轴 135°冰洲石晶体与光轴 45°向列液晶可变延迟器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)构成。其中,光轴 45°冰洲石晶体、光轴 0°半波片及光轴 135°冰洲石晶体构成宽视场结构,LCVR 用于各级峰值波长的调节和调谐。

根据偏振光传输机理,入射光经过可调谐液晶双折射滤光器第 i 级光学单元后的透过率与入射波长关系为:

$$T_i = \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{\pi \Delta n d_i}{\lambda} + \frac{\delta_{LC}^i}{2} \right), \quad (1)$$

其中: Δn 为冰洲石晶体的双折射率, d_i 为第 i 级冰洲石晶体的物理厚度, δ_{LC}^i 为第 i 级 LCVR 产生的相位延迟量。

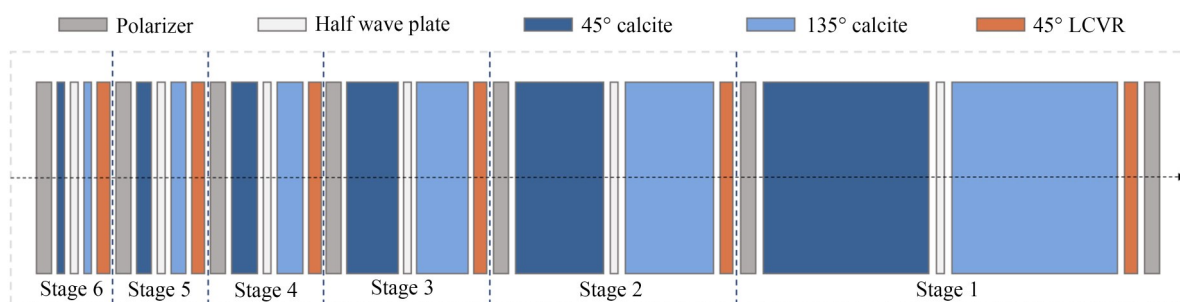


图 1 可调谐液晶双折射滤光器的工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of working principle for tunable liquid crystal birefringent filter

为实现窄带滤波特性,可调谐液晶双折射滤光器采用 6 级级联设计,各级冰洲石晶体厚度满足二倍递增规律,即 $d_1 = 2d_2 = 2^2d_3 = \dots = 2^5d_6$ 。滤光器的总透过率模型为:

$$T_{\text{Total}} = \prod_{i=1}^6 T_i = \prod_{i=1}^6 \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{\pi \Delta n d_i}{\lambda} + \frac{\delta_{LC}^i}{2} \right). \quad (2)$$

由公式(2)可知,对各级 LCVR 施加满足相位延迟量按倍数变化规律的驱动电压时,滤光器可在保持透射轮廓不变的条件下,完成光谱透射轮廓的平移,实现窄带滤波与连续波长调谐功能的需求。在太阳磁敏线 FeI 532.418 nm 附近的滤光器调谐示意图如图 2 所示。其中,黑色粗线为太阳标准谱线 FeI 532.418 nm,其余细线为透过中心偏离线心不同位置的滤光器理论透射轮廓。

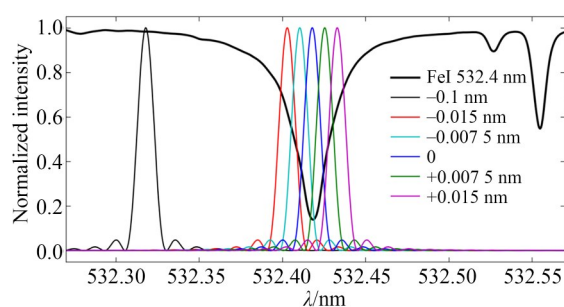


图 2 可调谐液晶双折射滤光器的调谐示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunable liquid-crystal birefringent filter tuning

2.2 基于激光超窄带特性的各级滤光单元线心标定原理

相较于待测窄带滤光器(带宽约 0.01 nm),所用超窄带激光带宽可达 10^{-6} nm,光谱线宽极

窄,可近似等效为特定波长位置的狄拉克函数。选用光电二极管作为光功率探测器件,采集光学系统出射的总光强信号。光路原理如图 3 所示,超窄带激光器发出的光首先经过空间滤波器形成具有一定发散角的点光源;随后经扩散片进一步扩展光斑,并通过光阑选取所需尺寸的光斑;接下来,光束依次经过半波片调制偏振方向,经准直镜以平行光并入射至滤光器。滤光器后端设置成像镜,并在成像镜焦点处放置光功率计,用于进行光强测量。

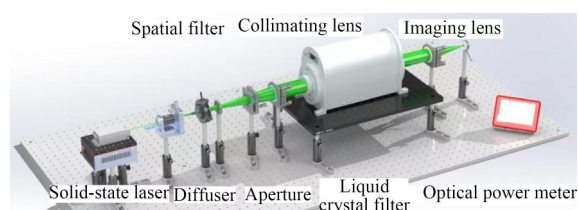


图 3 激光标定光路原理

Fig. 3 Schematic diagram of laser calibration optical path

可调谐液晶双折射滤光器高精度轮廓定标的核心在于完成各级滤光单元的通带线心对齐,使所有单元线心精准收敛至基准波长点,主要通过三步实现:首先,对单级滤光单元的 LCVR 开展电压调制扫描,采集光强响应信号,获得该级单元的电电压光强曲线;其次,提取电压光强曲线的峰值对应电压,将其定义为该级滤光单元的线心电压,调控驱动电压使该级单元稳定工作于线心位置,完成单级单元的基准波长对齐;最后,重复上述步骤完成各级滤光单元的线心标定,实现滤光器整机透射轮廓的高精度定标。

滤光器各级 LCVR 电压调制扫描过程中,激光超窄线宽特性使其等效为基准波长位置的狄拉克函数,单次采样光强信号等效为激光狄拉克函数与滤光器透射光谱的乘积。根据狄拉克函数筛选特性,任意函数与狄拉克函数相乘的运算结果,等于该函数在基准波长处的函数值与狄拉克函数的乘积:

$$T_{\text{Total}}(\lambda) \cdot \delta(\lambda - \lambda_0) = T_{\text{Total}}(\lambda_0) \cdot \delta(\lambda - \lambda_0). \quad (3)$$

基于该数学特性,其余未标定单元产生的附加相位仅以常数系数的形式作用于当前标定单元的透过轮廓,通过光强归一化处理即可完全消除附加相位带来的系数影响,消除多级串扰干扰,实现各级的峰值波长对齐和滤光器透过中心

波长定标。

2.3 基于激光超窄带特性的滤光器透射轮廓扫描原理

定标测试过程中,以固定波长的超窄带激光为光谱基准探针,通过调节滤光器各级 LCVR 相位延迟实现透过光谱整体平移;同步采集光谱平移过程中探测波段内的总光强,数学等效于激光光谱卷积滤光器光谱:

$$T_{\text{Total}}(\lambda) \cdot \delta(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_{\text{Total}}(\lambda') \delta(\lambda - \lambda') d\lambda'. \quad (4)$$

以波长为横坐标、归一化总光强值为纵坐标绘制超窄带激光扫描的滤光器透过轮廓,由狄拉克函数的卷积不变性,所得即为可调谐液晶双折射滤光器实际透过轮廓。

基于式(1)~式(3)构建数值仿真模型,设定激光中心工作波长为 532.418 nm,光谱扫描区间为 ± 0.05 nm,搭建包含超窄带激光光源、可调谐液晶双折射滤光器以及光功率探测器的端到端仿真光路,以波长为横轴、归一化光强为纵轴,绘制滤光器自身透射轮廓与激光扫描的透射轮廓。由图 4 可见,两组曲线高度吻合,端到端仿真结果展示了超窄带激光扫描滤光器的透射轮廓具备有效性与高精度特性。

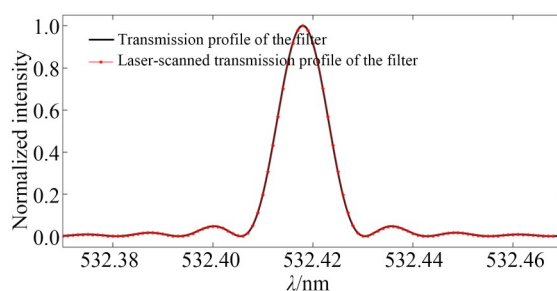


图 4 激光扫描仿真的滤光器透射轮廓

Fig. 4 Simulation of filter transmission profile scanned by laser

3 实验

3.1 可调谐液晶双折射滤光器透射轮廓的一致性验证

传统方法是滤光器中心波长固定,通过高分辨光谱仪或者可调谐激光器获得滤光器的透射轮廓;而本文的激光定标方法是激光光源中心波长固定,通过滤光器中心波长调谐得到滤光器的

透射轮廓。因此,该方法实现的基本前提是可调谐液晶双折射滤光器的透射轮廓具有较好的一致性。

实验所用可调谐液晶双折射滤光器为太阳极轨天文台 SPO 卫星磁场与速度场成像仪 MHI 鉴定件滤光器,各级滤光单元采用宽视场设计,六级滤光单元级联,具体设计参数见表 1。滤光器主体结构示意图与滤光器内部通光观察图片如图 5 所示。

表 1 SPO/MHI 鉴定件滤光器的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of SPO/MHI prototype filter

Performance/unit	Parameter value
Central operating wavelength/nm	532.42
Full width at half maximum/nm	0.011
Tunable range/nm	± 0.25
Operating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	30 ± 0.01
Bandwidth of the pre-interference filter/nm	0.5 ± 0.2
Thickness of iceland spar crystal for the narrowest bandwidth stage/mm	64.35

实验验证光路如图 6 所示,太阳光经定天镜系统引入望远系统,由准直镜完成光束准直入射至滤光器,经滤光器调制的出射光束由成像镜聚焦至高分辨光谱仪狭缝,最终利用暗室环境下的高分辨光谱仪完成光谱信号采集与记录,光谱仪像元分辨率为 0.0018 nm ,光谱分辨本领约为 100 000。

实验选取的光谱为太阳特征谱线 FeI 532.000~532.418 nm, $0, \pm 0.012, \pm 0.024$ 的无显著吸收发射线位置,以 0.012 nm 的光谱步长沿长波方向整移滤光器的透射轮廓,绘制整移过程中各中心波长点对应的定标滤光器透射轮廓,如图 7(a)所示。

由光谱测试结果可知,在连续波长调谐过程中,可调谐液晶双折射滤光器的透射轮廓形态保持高度一致性,无明显形变与畸变,表明该滤光器具备优异的调谐稳定性。如图 7(b)所示,峰位对齐后的 5 条透射曲线,两两决定系数 R^2 均值最大为 0.992、最小为 0.981,相关系数 R 均值最大为 0.996、最小为 0.991,两两 RMSE 均值最小为 0.010、最大为 0.018,表明各曲线形貌高度相关、

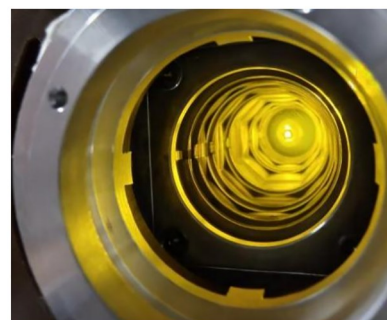
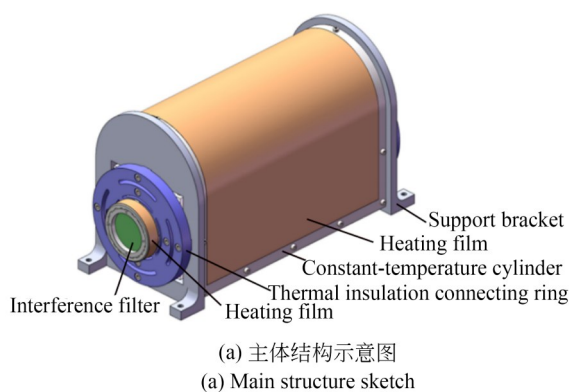


图 5 鉴定件滤光器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of prototype filter

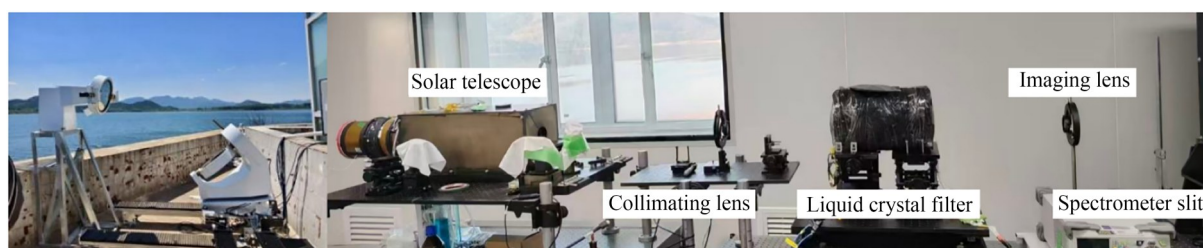
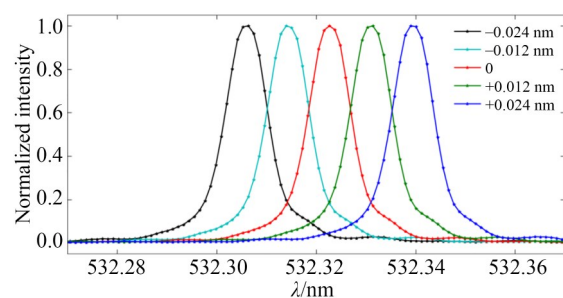
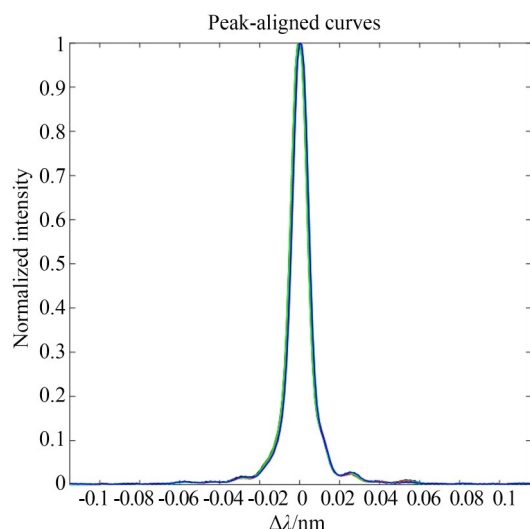


图 6 滤光器透射轮廓稳定性验证光路实物

Fig. 6 Physical diagram of optical path for filter passband profile stability verification



(a) 实测轮廓
(a) Measured contour map



(b) 峰位对齐的轮廓对比
(b) Peak-aligned profile comparison

图 7 高分辨光谱仪采集的光谱轮廓与标准太阳光谱耦合示意图

Fig. 7 Schematic illustration of superimposed of spectral profiles acquired by a high-resolution spectrometer and standard solar spectrum

逐点偏差极小;各曲线半高全宽均值为 0.009 9 nm,标准差仅为 0.000 1 nm,说明线宽稳定性优异。上述指标从形貌相关性、逐点偏差与线宽稳

定性三个维度定量证明了调谐过程中透射轮廓的高度一致性。结合定标原理,本文采用激光探针扫描方式采集固定激光工作波长下可调谐滤光器的透射光强,以此反演重构滤光器透射轮廓;滤光器连续调谐过程中的透射轮廓稳定性,表明本文所采用的超窄带激光定标方法具备可行性。

3.2 可调谐液晶双折射滤光器的透射轮廓激光定标

为进一步验证本文所提超窄带激光定标方法的实测效果,开展了可调谐液晶双折射滤光器的透射轮廓定标实验。为满足 SPO/MHI 的整机测试需求,研制了一套激光定标光源,将入射激光转换为指定口径的面源准直光束,以此作为待测整机系统的标准输入光源,满足整机测试的光源条件。图 8 所示为窄带激光器激光定标实验光路。出射光首先经过空间滤波器,形成具有一定发散角的点光源;随后经扩散片进一步扩展光斑,并通过光阑选取所需尺寸的光斑,再经扩束系统形成具有一定视场的平行光,平行光束经过在窄带激光光源后端放置待检测系统后由成像镜将光束汇聚到光功率计上,进行光强测量。

依据图 8 搭建的激光定标实验光路如图 9(a)所示,激光器选用 Oxxius 公司的 LCX-532S 半导体泵浦固体激光器,中心波长为 $(532.3 \pm 0.3) \text{ nm}$,光谱线宽 $\leq 1 \text{ MHz}$,相当于半高全宽 $\leq 10^{-6} \text{ nm}$ 。探测器选用 Thorlabs 公司的 PM400 光二极管,实时记录探测总光强。参照 2.2 节提出的逐级线心定标流程,开展可调谐液晶双折射滤光器的透射轮廓激光定标实验,通过超窄带激光扫描获取滤光器实测透射轮廓。图 9(b)给出了理论模拟仿真、激光

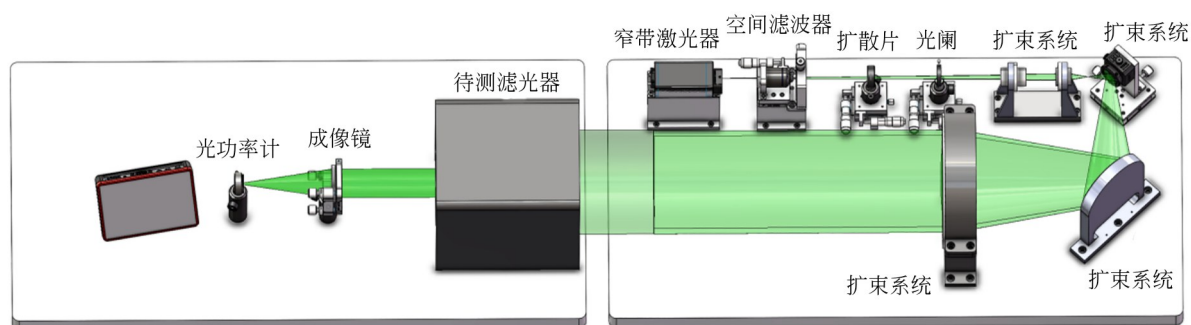
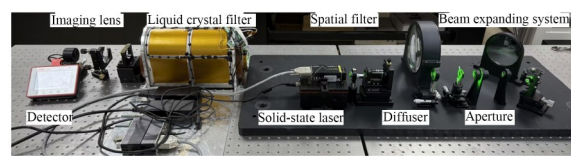


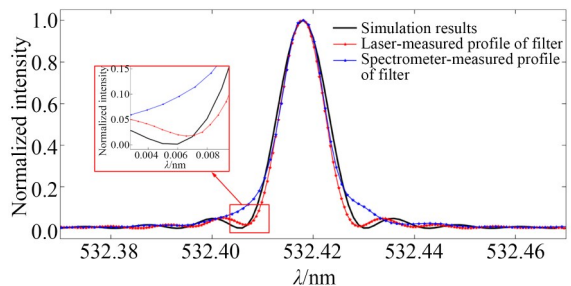
图 8 激光定标实验光路

Fig. 8 Laser calibration experimental optical path

定标以及高分辨光谱仪定标对比结果。



(a) 激光定标实验光路实物
(a) Physical diagram of laser calibration experimental optical path



(b) 激光扫描滤光器的实测透射轮廓
(b) Measured passband profile of filter via laser scanning

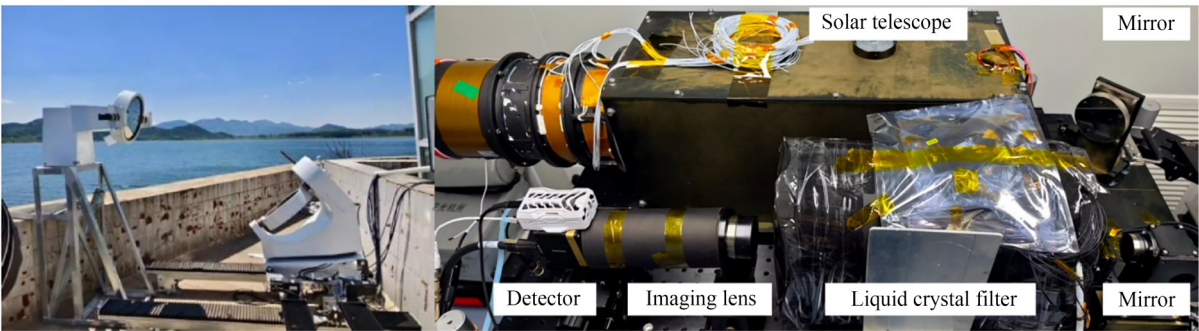
图 9 激光定标实验

Fig. 9 Laser calibration experiment

如图 9(b)所示,在相同环境条件下进行了 5 组独立激光定标重复测量。统计结果如下:峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)均值为 25.91 dB,样本标准差为 0.12 dB;积分旁瓣比(Integration Side Lobe Ratio, ISLR)均值为 -8.41 dB,样本标准差为 0.15 dB;半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)5 组测量结果均为 0.009 8 nm,重复性良好。采用 Thorlabs PM400 光功率计对 Oxxius LCX-532S 激光器输出功率进行全程实时监测,实测整个标定周期内激光输出功率波动不超过 $\pm 0.6\%$,标准不确定度为 0.346%。Thorlabs PM400 光功率计的

噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)约为 $10^{-13} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级,实验过程中入射光功率始终大于 $1 \mu\text{W}$,因此,暗噪声相对于测量信号的贡献值低于 0.01%,可忽略不计。温度变化为 0.01°C ,可调谐液晶双折射滤光器的中心波长变化约为 0.03% nm,在 532 nm 工作波长下,其相对不确定度接近于零,对合成不确定度的贡献可忽略。因此,激光标定系统的合成标准不确定度约为 0.346%,其中激光器功率波动是本标定系统不确定度的主要来源。如图 9(b)局部放大图所示,受器件制造误差、液晶偏振特性及光路准直度等实际因素影响,激光定标得到的滤光器透射轮廓的主极小值比仿真结果略高 1.6%,可认为激光定标的滤光器轮廓形态与端到端仿真结果高度吻合;高分辨光谱仪得到的透射轮廓半高全宽与激光定标结果一致,均为 0.009 8 nm,略低于仿真的半高全宽值为 0.01 nm,其原因与滤光器内部冰洲石晶体的厚度精度有关,但高分辨光谱仪得到的透射轮廓主极小位置明显被平滑,表现出由于仪器函数与真实谱的卷积效应引起的旁带展宽。该测试实验验证了激光定标方法具备更好的标定效果。

将激光定标后的滤光器装入图 10(a)所示的太阳望远镜进行太阳光谱实测。太阳光经由定天镜引入太阳望远镜,光束经两次反射后入射至可调谐液晶双折射滤光器,最终通过成像镜成像至焦面相机(Imperx B6640),通过滤光器波长调谐扫描和焦面相机配合实现太阳光谱轮廓扫描。结合激光工作波长与太阳特征谱线 532.418 nm 的波长对应关系,将激光标定得到的线心参数精准对齐至太阳特征谱线,完成太阳光路下的



(a) 光路实物图
(a) Physical layout of optical path

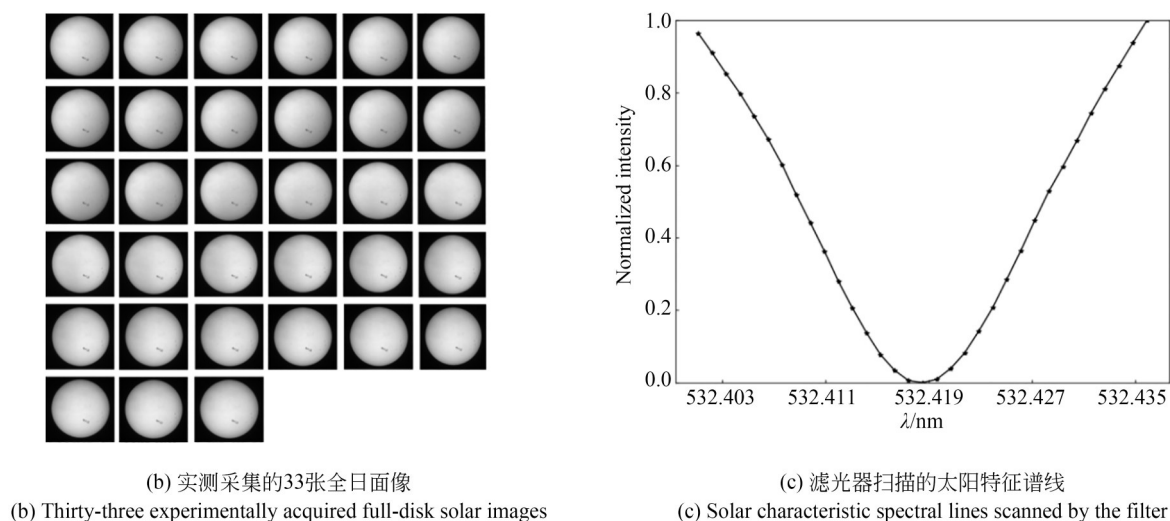


图 10 太阳光谱扫描实验结果

Fig. 10 Solar spectrum scanning experiment results

对比验证。实验光谱扫描范围设定为 ± 0.016 nm,光谱采样间隔设置为 0.001 nm,共采集33张全日面像(图10(b)),取每张全日面像的中心 50×50 像素的总光强值,绘制滤光器扫描的归一化太阳特征谱线,如图10(c)所示。

由图10(c)可知,激光定标的可调谐液晶双折射滤光器可以扫描获得太阳特征谱线轮廓,扫描的太阳 532.418 nm特征谱线形貌光滑,进一步验证经激光标定后的可调谐双折射液晶滤光器通带定标准确,由此表明,超窄带激光定标方法具备高精度标定特性。

4 结 论

本文提出了一种基于超窄带激光的可调谐液晶双折射滤光器透射轮廓定标方法,系统分析了激光定标原理,阐明超窄带激光可有效隔绝多级滤光单元间的相位串扰,有效实现中心波长校准和透射轮廓标定。滤光器连续调谐的一致性奠定了超窄带激光定标方法的基础。实验测得的滤光器激光定标透射轮廓与全链路仿真结果高度一致,且实测轮廓精度优于高分辨光谱仪的测试结果。相较于传统太阳光或卤素灯的定标方案,超窄带激光定标方法解决了高分辨光谱仪难以获取滤光器的准确透射轮廓、无法实现整机系统级透射轮廓标定的问题,定标简捷高效、精

度高,可实现实验室常态化快速定标。本实验的可调谐液晶双折射滤光器通过主动温控系统稳定在 (30 ± 0.003) $^{\circ}\text{C}$,内部温度波动与环境解耦对应受温度变化引起的中心波长漂移不超过 0.009% nm,远小于 0.01 nm量级的透射轮廓半高全宽,即通过高精度温控系统保障了超窄带激光定标的隔绝多级串扰干扰效果。本文方法已应用于太阳极轨天文台磁场与速度场成像仪鉴定件滤光器的透射轮廓定标任务,定标结果可为在轨获取高精度科学观测数据提供可靠性保障;未来可将相关思路与方法推广到其他窄带可调谐滤光器应用场景,为其高精度标定提供技术参考。

作者贡献声明:

王哲楷:论文构思与撰写,程序编写与实验验证;

沈宇樑:光源光路设计,实验平台搭建;

高碧源:滤光器测试;

杨景杰:数据可视化呈现;

白 阳:滤光器液晶驱动设计;

佟立越:数据采集软件编写;

孙英姿、孙文君:滤光器研制;

侯俊峰:方法提出,论文指导与审核;

王东光:论文指导与审核。

参考文献:

- [1] 邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台[J]. 科学通报, 2023, 38(4): 298-308.
DENG Y Y, ZHOU G P, DAI S H W, *et al.* Solar polar-orbit observatory [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 38(4): 298-308. (in Chinese)
- [2] DENG Y Y, TIAN H, JIANG J, *et al.* Probing solar polar regions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 913.
- [3] MUDGE J, TARBELL T. In situ calibration of tunable filters: Lyot and Michelson[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4978.
- [4] MORRIS H R, HOYT C C, TREADO P J. Imaging spectrometers for fluorescence and Raman microscopy: acousto-optic and liquid crystal tunable filters [J]. *Applied Spectroscopy*, 1994, 48 (7) : 857-866.
- [5] 云茂金, 李国华, 吴福全, 等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. 光学学报, 2003, 23 (5): 627-631.
YUN M J, LI G H, WU F Q, *et al.* Characteristics of lyot tunable liquid crystal filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 627-631. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 艾国祥, 胡岳风. 太阳磁场望远镜的提出和工作原理[J]. 北京天文台台刊, 1986, 8:1-10.
AI G X, HU Y F. The propose for the solar magnetic field telescope and its working theory[J]. *Publications of the Beijing Astronomical Observatory*, 1986, 8:1-10. (in Chinese)
- [8] SCHARMER G B, LÖFDAHL M G, SLIEPEN G, *et al.* Is the sky the limit? Performance of the re-vamped Swedish 1-m Solar Telescope and its blue- and red-beam reimaging systems[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 626: A55.
- [9] 侯俊峰, 孙英姿, 林佳本, 等. 可调谐液晶双折射滤光器的原位定标方法[J]. 光子学报, 2023, 52 (5): 96-105.
HOU J F, SUN Y Z, LIN J B, *et al.* In situ calibration of the tunable liquid-crystal birefringent filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(5): 96-105. (in Chinese)
- [10] 王希群, 梁永军, 张军平, 等. 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[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2423001.
WANG X Q, LIANG Y J, ZHANG J P, *et al.* Development of rapid tunable lyot filter and its observation on 1 m new vacuum solar telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(24): 2423001. (in Chinese)
- [11] 朱瑾, 马琳, 金振宇, 等. 基于双波长强度调制的法布里-珀罗滤光器中心波长定标[J]. 光学学报, 2024, 44(24): 2428002.
ZHU J, MA L, JIN ZH Y, *et al.* Center wavelength calibration of fabry-perot filter based on dual-wavelength intensity modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(24): 2428002. (in Chinese)
- [12] SCHOU J, SCHERRER P H, BUSH R I, *et al.* Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (HMI) instrument on the solar dynamics observatory (SDO) [J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 229-259.
- [13] DENG Y Y, ZHANG H Y, YANG J F, *et al.* Design of the full-disk MagnetoGraph (FMG) on-board the ASO-S [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 157.
- [14] LYOT B. Optical apparatus with wide field using interference of polarized light [J]. *C. R. Acad. Sci. Ser. A*, 1933, 197: 1593.
- [15] EVANS J W. The birefringent filter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949, 39 (3): 229.

作者简介:



王哲楷(1999—),男,内蒙古乌海人,博士研究生,2020年于中山大学获得学士学位,2023年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事偏振光学方面的研究。E-mail: 13614737117@163.com

通讯作者:



侯俊峰(1986—),男,山西晋城人,博士,正高级工程师,博士生导师,2013年于中国科学院国家天文台获得博士学位,主要从事太阳磁场测量和偏振光学方面的研究。E-mail: jfhou@bao.ac.cn