

引用格式: ZHANG Hefei, ZHOU Qianhan, YANG Jinsheng, et al. Sparse Calibration Method for Instrumental Polarization of Solar Telescopes Based on Model-Guided Residual Interpolation[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0812001

张贺菲,周千涵,杨金生,等. 基于物理模型引导残差插值的太阳望远镜仪器偏振稀疏定标方法[J]. 光子学报, 2026, 55(8): 0812001

基于物理模型引导残差插值的太阳望远镜仪器偏振稀疏定标方法

张贺菲^{1,2,3,4}, 周千涵^{1,2,3,4}, 杨金生^{1,2}, 梁凤仪^{1,2,3}, 张兰强^{1,2,3}, 饶长辉^{1,2,3}

(1 自适应光学全国重点实验室, 成都 610209)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要:针对太阳望远镜硬件定标占用观测时间长、物理模型构建复杂度高的问题,提出一种基于物理模型预测与稀疏硬件定标相融合的混合校准框架。构建望远镜系统的穆勒矩阵物理模型,搭建可复现望远镜偏振特性的室内双反射镜实验系统,通过长时序测量定标系统穆勒矩阵测量重复性达 10^{-4} 量级,为校正性能评估提供可靠基准。在 $20^{\circ}-80^{\circ}$ 指向角范围内开展稀疏定标验证,相比传统密集定标需要31个定标点,本文仅采用4个离散定标点即可完成模型参数修正与全角度仪器偏振校正。实验结果表明,所提物理模型引导残差插值(MGRI)混合框架将全域穆勒矩阵RMSE由传统线性插值的0.0193降至0.0070,误差抑制率达64.0%;仪器偏振IP均值由0.0453降至0.0073,抑制率84.0%,偏振串扰得到显著抑制。该方案在大幅减少定标频次、节约观测时间的同时,高效抑制机架旋转引入的动态仪器偏振与分量串扰,为地基大口径太阳望远镜高效率、高精度偏振校准提供了兼具实用性与鲁棒性的工程方案。

关键词:太阳望远镜;仪器偏振;偏振校正;偏振定标;穆勒矩阵

中图分类号:TH743

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265508.0812001

0 引言

高精度的太阳磁场偏振测量是理解耀斑等太阳活动物理机制、实现空间天气灾害预报的核心前提^[1]。然而,现代大口径太阳望远镜(如DKIST^[2]、NVST^[3]、CLST^[4]等)普遍采用地平式(Alt-Az)机架,在跟踪目标时,光学元件间的相对旋转会引入强烈的动态仪器偏振(Instrumental Polarization, IP)和偏振串扰,严重干扰真实的太阳偏振信号^[5]。传统赤道式望远镜的静态校准方法在此类复杂时变系统中已完全失效^[6]。

作为我国首台近2米级太阳光学观测设备,中国大型太阳望远镜(Chinese Large Solar Telescope, CLST)以实现太阳光球与色球矢量磁场的高分辨测量为核心科学目标,于2020年成功实现首光^[7],标志着我国在大口径太阳探测能力上的显著提升。该望远镜是一台地平式同轴格里高利望远镜,其主镜口径为1.76 m,后段分别配备了用于测量斯托克斯谱线轮廓的光栅光谱仪以及用于偏振成像的Lyot滤光器^[8]。近年来,随着CLST在自适应光学^[9]、热控系统^[10-12]等关键技术上的不断完善与突破,开展高质量的科学观测已具备坚实的硬件基础。然而,受光学系统多次反射与机架跟踪旋转的共同影响,CLST在全天域观测中同样存在显著的动态仪器偏振,测量易受反射膜层、装调误差及指向变化等因素的耦合干扰。为保障矢量磁

基金项目:国家自然科学基金(12527802)

第一作者:张贺菲, zhanghefei23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:饶长辉, chrao@ioe.ac.cn

收稿日期:2026-04-20;录用日期:2026-06-09

<http://www.photon.ac.cn>

场反演精度,必须对全指向角范围内的仪器偏振进行精确定标与实时校正。尽管前期研究已针对CLST的偏振定标单元(Polarization Calibration Unit, PCU)设计^[8]、偏振调制器定标^[13]与光学偏振补偿方案^[14]进行了初步探索,但开展全系统级、高精度的动态仪器偏振定标,消除旋转光路带来的偏振串扰,已成为解锁该望远镜高精度磁场测量能力的关键瓶颈。为此,开展本文研究工作。

为抑制上述动态仪器偏振,国际主流大口径望远镜通常在光路前端集成偏振定标单元(PCU)以进行实时硬件定标^[15-18]。然而,高频的硬件定标必须频繁中断科学观测,极大降低了观测效率。因此,在实际工程观测中,往往只能在有限的离散指向角处进行稀疏定标。由于系统的穆勒矩阵随旋转角具有强烈的非线性特征,仅靠传统纯数值插值方法处理稀疏定标数据时,在非定标点(定标盲区)容易引发截断与插值误差,难以满足连续观测的严苛需求。

为突破传统数值插值在非定标盲区易发散的局限,国际主流太阳望远镜普遍将物理约束模型引入偏振校准体系。在定标策略与校正精度方面,HARRINGTON D M等基于Berreman矩阵为DKIST构建了整合多层增强银镀膜参数的高保真偏振模型,通过结合偏振定标单元(PCU)的密集扫描与系统级多光源交叉验证,实现了穆勒矩阵各元素拟合残差优于 10^{-3} 量级的高精度^[19-20];BECK C等针对德国VTT及HOFMANN A等针对GREGOR望远镜,提出了一种基于菲涅尔方程的半经验偏振模型,结合定标数据实时更新等效复折射率与相位延迟参数,成功将全视场仪器偏振残差控制在 10^{-3} 量级,偏振串扰抑制在 10^{-2} 量级^[18,21];此外,SKUMANICH A等在先进斯托克斯偏振仪(ASP)的定标中,采用响应矩阵静态参数化拟合策略,同样实现了接近 2×10^{-3} 的校正精度^[22]。

上述基于物理模型约束的定标研究在绝对残差控制上已取得显著进展,但其共性局限日益凸显:高精度模型的维持高度依赖于密集且高频的硬件定标数据以不断修正模型参数。在科学观测时间极为宝贵、仅能获取少数离散定标点(即稀疏定标)的实际工程场景下,现有纯物理模型难以穷尽并吸收系统内部随时间演化的微小非对称误差(如镀膜局部氧化、机械应力微形变),其在广域定标盲区内的预测残差往往退化至 10^{-2} 量级甚至更高;而退回传统纯数值插值策略,又会因欠采样引发较强的截断发散。目前,针对在地平式系统大角度定标盲区内同时抑制非线性振荡与系统偏差,尚缺乏系统性的理论框架。

为此,本文提出一种基于物理模型引导的残差插值(Model-Guided Residual Interpolation, MGRI)混合校正框架,以期为CLST等大口径望远镜提供兼具精度与效率的定标方案。该框架以优选的多参数解耦物理模型为基底,精准吸收动态偏振的非线性演化趋势;在此基础上,仅利用少量的稀疏硬件定标点(如4个离散角度)对平滑后的残差进行插值补偿。室内高精度等效实验验证表明,该方法有效克服了稀疏盲区的预测失效难题,为大口径太阳望远镜实现高效率、全指向角的高精度偏振测量提供了兼具精度与鲁棒性的工程方案。

1 动态仪器偏振建模与混合校正方法

1.1 穆勒矩阵与动态仪器偏振模型

要实现对动态IP的有效校正,首先需要建立精确描述仪器穆勒矩阵与望远镜指向角之间函数关系的物理模型。IP效应由系统的穆勒矩阵(Mueller Matrix)描述,以Stokes矢量($S=[I \ Q \ U \ V]^T$)描述光的偏振状态,对于偏振态为 S_{in} 的待测光,其经过望远镜系统后偏振态变为 S_{out} ,其表达式为

$$S_{out} = M \ S_{in} \quad (1)$$

式中,穆勒矩阵 M 的各个元素不仅描述了仪器偏振($I \rightarrow Q, U, V$),更量化了不同偏振分量之间的串扰(如 $Q \leftrightarrow U$)和退偏(如 $Q \rightarrow Q$),显著制约磁场测量精度。

$$\begin{bmatrix} I \rightarrow I & Q \rightarrow I & U \rightarrow I & V \rightarrow I \\ I \rightarrow Q & Q \rightarrow Q & U \rightarrow Q & V \rightarrow Q \\ I \rightarrow U & Q \rightarrow U & U \rightarrow U & V \rightarrow U \\ I \rightarrow V & Q \rightarrow V & U \rightarrow V & V \rightarrow V \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据菲涅尔公式,单个光学反射界面的穆勒矩阵 M_{mirror} 是入射角 θ 和膜层复折射率 $\tilde{n} = n - ik$ 的函数,具体形式为

$$\mathbf{M}_{\text{mirror}} = \begin{bmatrix} \frac{(R_s + R_p)}{2} & \frac{(R_s - R_p)}{2} & 0 & 0 \\ \frac{(R_s - R_p)}{2} & \frac{(R_s + R_p)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_s R_p} \cos \delta & \sqrt{R_s R_p} \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sqrt{R_s R_p} \sin \delta & \sqrt{R_s R_p} \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, δ 为相位差, R_s, R_p 分别为 s 偏振(垂直入射面)、p 偏振(平行入射面)的反射率, 由菲涅尔方程导出。然而, 实际望远镜中光学元件的复折射率往往受镀膜工艺及环境氧化影响, 并非理想定值, 这为后续模型修正引入了必要性。

对于地平式太阳望远镜, 观测跟踪过程中部分反射镜存在相对旋转关系。系统的总穆勒矩阵 $\mathbf{M}_{\text{all}}$ 可表示为 N 个元件的穆勒矩阵与旋转矩阵的有序乘积

$$\mathbf{M}_{\text{all}}(\alpha, \beta) = \mathbf{M}_N \cdot \mathbf{R}_N \cdots \mathbf{M}_i \cdot \mathbf{R}_i(\alpha, \beta) \cdots \mathbf{M}_1 \quad (4)$$

在此, 本研究采用标准地平坐标系: 定义高度角 α 为视线与地平面夹角, 方位角 β 为相对于正北方向的顺时针旋转角。在跟踪过程中, α 与 β 的联动直接决定了旋转矩阵 $\mathbf{R}_i$ 的形式, 从而使得系统总 IP 表现为指向角的动态函数。在实际观测中, 高度角 α 在短时间跟踪过程中变化相对缓慢, 且对于特定观测目标, 高度角范围相对有限。因此, 本文模型主要考虑方位角 β 的影响, 高度角 α 可视为慢变参数, 在不同高度角区间可通过重新定标进行模型参数更新。

1.2 物理模型构建与参数优化

根据式(3), 单个金属镀膜反射镜的穆勒矩阵主要由互相正交偏振分量的反射率(R_s 与 R_p)以及二者产生的相位延迟 δ 共同决定。传统偏振建模通常采用理想对称假设, 即同一光路中同类反射镜的偏振参数完全一致。但在真实地平式望远镜中, 镀膜氧化、装调偏差与机械应力会使反射镜间存在不可忽略的偏振差异, 直接导致模型预测出现系统偏差。

为精确捕捉这一非理想物理效应, 同时兼顾非线性参数拟合的收敛稳定性, 本文针对望远镜系统中最核心的动态偏振耦合单元(两个产生相对旋转的主体反射镜), 构建了不同拟合参数数量(5, 8, 10)的穆勒矩阵物理模型, 并引入角度依赖动态相位延迟模型补偿旋转引入的二阶扰动。

$$\delta(\beta) = \delta_0 + k_1 \beta + k_2 \beta^2 \quad (5)$$

式中, β 为反射镜方位旋转角; δ_0 为初始相位; k_1, k_2 为动态相位演化系数。

5 参数模型(Model A): 两反射镜共享($R_s, R_p, \delta_0, k_1, k_2$)全部参数;

8 参数模型(Model B): 两反射镜静态参数($R_{s1}, R_{p1}, \delta_{10}$ 与 $R_{s2}, R_{p2}, \delta_{20}$)相互独立, 但共享动态系数(k_1, k_2);

10 参数模型(Model C): 静态参数与动态系数($k_{11}, k_{21}, k_{12}, k_{22}$)完全独立。

在后续基于全周期测量数据的模型交叉验证中表明, 高度简化的模型难以吸收非对称物理偏差, 而参数完全解耦的 10 参数模型能够最真实地重构双镜间固有的微小差异, 将全域拟合均方根误差(RMSE)降至最优水平。因此, 本文选取最精确的 10 参数模型作为核心物理先验基底。

1.3 物理模型引导残差插值原理

在大型太阳望远镜的实际科学观测中, 受限于宝贵的曝光窗口与光照条件, 定标单元往往仅能在少数大间隔的离散机架角度进行硬件定标操作。针对这种稀疏定标场景, 现有的纯数学离散插值法在非定标点盲区存在严重缺陷。由于仪器偏振矩阵元素随角度呈强烈的非线性振荡变化, 直接对稀疏采样的实测穆勒矩阵 $\mathbf{M}_{\text{meas}}(\beta)$ 进行低阶或样条插值, 会因欠采样截断效应引发较大的插值误差。另一方面, 若仅依赖上述构建的物理模型进行全域解析预测, 虽然保障了矩阵随角度演化的连续性, 但由于纯物理模型永远无法穷尽气流扰动、非共面误差等高阶微观效应, 始终会残留一定的系统性静态偏差。

针对纯数学插值在稀疏定标条件下易出现较大偏差与纯物理模型存在系统性残差的问题, 本文提出一种基于物理模型引导的残差插值(Model-Guided Residual Interpolation, MGRI)混合校正新框架。该框架的理论核心是利用物理模型精准吸收非线性的动态趋势, 再将问题转化至平滑的残差空间进行误差补偿。

设 $\mathbf{M}_{\text{model}}(\beta)$ 为 10 参数最优模型在角度 β 处的预测矩阵, $\mathbf{M}_{\text{meas}}(\beta)$ 为对应实测矩阵, 定义残差矩阵

$$D(\beta) = M_{\text{meas}}(\beta) \times M_{\text{model}}^{-1}(\beta) \quad (6)$$

基于菲涅尔公式构建的系统穆勒矩阵物理模型已精准复现由几何旋转主导的周期性变化,经上式逆运算后,原始穆勒矩阵的非线性被大幅抑制。

在稀疏定标点 $\{\beta_i\}$ 处获取实测残差 $D(\beta_i)$,对残差矩阵执行线性插值即可得到任意非定标点 β 处的残差估计 $D_{\text{interp}}(\beta)$ 。将插值残差与模型预测矩阵相乘,得到全域高保真校正矩阵

$$M_{\text{corr}}(\beta) = D_{\text{interp}}(\beta) \times M_{\text{model}}(\beta) \quad (7)$$

最终校正采用逆矩阵补偿实现仪器偏振抑制

$$S_{\text{true}} = M_{\text{corr}}^{-1}(\beta) \times S_{\text{meas}} \quad (8)$$

式中, S_{meas} 为观测斯托克斯矢量, S_{true} 为校正后真实偏振信号。

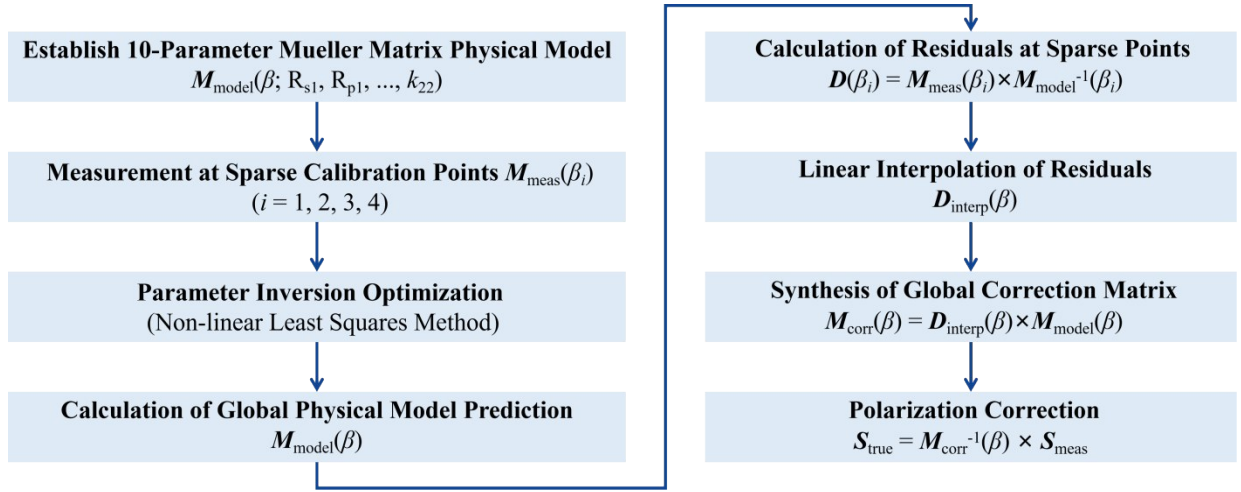


图1 MGRI方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the MGRI method

MGRI框架的具体实现流程如图1所示,将物理模型的强约束与残差插值的自适应补偿有机结合,在少量定标点条件下仍能保证全域指向角校正精度,为传统稀疏定标插值精度不足提供了改进方案。

2 实验系统搭建与基准精度测试

2.1 双反射镜动态偏振测试平台

2.1.1 实验系统

为在实验室条件下复现地平式太阳望远镜的动态仪器偏振(IP)演化规律,本文搭建双反射镜动态偏振模拟系统,作为可复现望远镜跟踪时几何旋转与相位延迟耦合效应的最小物理单元,能够完整覆盖偏振演化的核心物理机制。

系统由光源、偏振态产生单元(Polarization State Generator, PSG)、双反射镜模拟单元、偏振态分析单元(Polarization State Analyzer, PSA)、同步双相机探测器五部分组成,结构如图2所示。固定反射镜M1,使反射镜M2可绕竖直轴做方位角旋转,以此模拟望远镜机架跟踪时的镜组相对运动。根据前述理论,该系统的总穆勒矩阵可表示为

$$M_{\text{sys}}(\beta) = M_2 \times R_1(\beta) \times M_1 \quad (9)$$

式中, M_1 、 M_2 分别为两反射镜穆勒矩阵; $R(\beta)$ 为方位角旋转矩阵; β 为 M_2 旋转角。

实验光源采用532nm单色稳频激光器,输出光束经准直后形成平行光照明。偏振态产生单元(PSG)由高消光比线偏振片与消色差1/4波片级联构成,可精准生成-45°线偏振、0°线偏振、左旋圆偏振、右旋圆偏振四类标准输入偏振态,为系统提供已知基准偏振信号。

双反射镜单元为核心模拟模块,两块镀银反射镜M1与M2安装于光学爬高架上;实验中M1与M2的物理位置固定,通过手动调整M2的方位角取向并锁定,在20°~80°范围内以2°为步进依次完成各角度位置的

穆勒矩阵测量。每个角度位置调整后,待系统稳定后进行数据采集。这种方式等效于地平式望远镜跟踪过程中反射镜组绕方位轴的相对旋转效应,可复现镜组间的动态偏振耦合关系。

偏振态分析单元(PSA)采用六通道离散检偏方案,将4个线偏振片与2个圆偏振片集成于电动滤光轮,可快速切换获取六组独立检偏光强。探测端采用同步双相机架构:由非偏振分束立方将光束分为两路, Cam1为参考相机,直接记录光源强度波动; Cam2为测量相机,记录经双反射镜系统后的出射光强。两路信号实时同步采集,利用光强比值 $I_{\text{Cam2}}/I_{\text{Cam1}}$ 做归一化处理,可有效抑制光源功率漂移、环境振动等共模噪声。

实验选取 $20^\circ \sim 80^\circ$ 的方位角旋转范围,主要基于以下考虑:该范围覆盖了太阳望远镜在典型观测时段内的主要跟踪角度区间,能够充分体现仪器偏振随角度的非线性变化特征;同时,该范围内穆勒矩阵元素呈现显著的周期性振荡,适合验证物理模型对动态偏振效应的描述能力。在实际望远镜应用中,可根据具体观测需求扩展至全周期 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围。

本实验平台主要模拟地平式太阳望远镜中由镜组相对旋转引入的动态偏振效应,这是系统仪器偏振的主要来源。真实望远镜系统还包含更多反射面、透射元件、滤光片等光学面,以及制造装调偏差、膜层参数差异、热环境变化及长期运行漂移等因素。本文 MGRI 方法的核心思想是利用物理模型吸收主要的几何旋转效应,再通过稀疏定标点的残差插值补偿其他次要误差源。因此,该方法在真实望远镜应用时,需根据具体光路配置重新构建相应的穆勒矩阵物理模型,并通过实际定标数据进行参数修正。本实验平台的验证结果为该方法在稀疏定标条件下的有效性提供了原理性支撑。

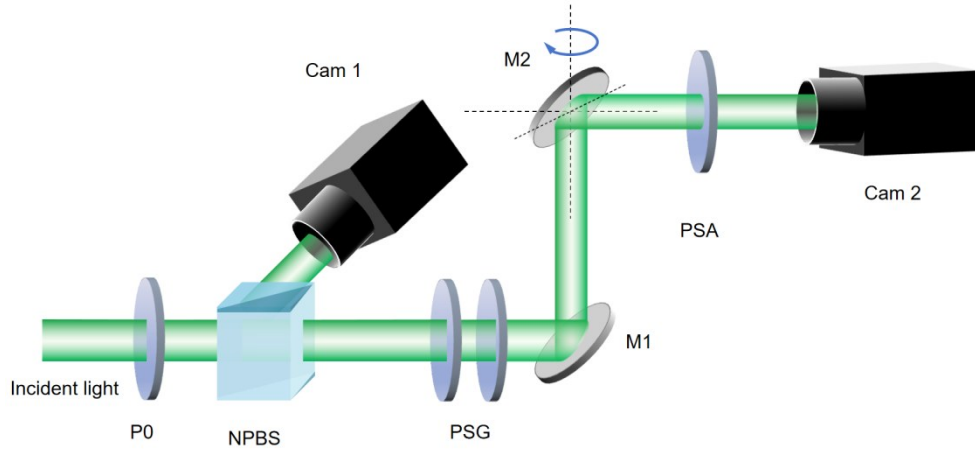


图2 双反射镜偏振测量系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-reflector polarization measurement system

2.1.2 穆勒矩阵反演流程

偏振态产生单元(PSG)可生成4种已知偏振态,构成 4×4 的生成矩阵 W_{PSG} ;偏振态分析单元(PSA)可解析6种偏振态,构成 6×4 的分析矩阵 W_{PSA} 。在特定机架指向角 β 下,探测器采集到的 6×4 维光强响应矩阵 $I(\beta)$ 可表示为

$$I(\beta) = W_{\text{PSA}} \times M_{\text{sys}}(\beta) \times W_{\text{PSG}} \quad (10)$$

本实验采用六态偏振解调方案,选取4组线性独立线偏振态与左、右旋圆偏振态构成完备测量基,具备优异的抗噪声性能与解调稳定性。利用双相机同步采集数据,以 Cam2/Cam1 光强比值做归一化处理,可有效消除光源功率波动的影响。在此基础上,通过计算 W_{PSA} 和 W_{PSG} 的广义逆矩阵,即可高精度反演得到当前角度下系统穆勒矩阵的实测值 $M_{\text{meas}}(\beta)$

$$M_{\text{meas}}(\beta) = W_{\text{PSA}}^+ \times I(\beta) \times W_{\text{PSG}}^+ \quad (11)$$

反演得到的 $M_{\text{meas}}(\beta)$ 完整包含双反射镜系统的偏振耦合响应与实验平台的二阶系统误差,可作为后续模型验证与校正算法的基准实测数据。

2.2 系统测量极限与误差基准评估

为精准量化实验系统的固有测量精度,本研究设计了固定角度长时序测量方案:在 20° 至 60° 范围内选取

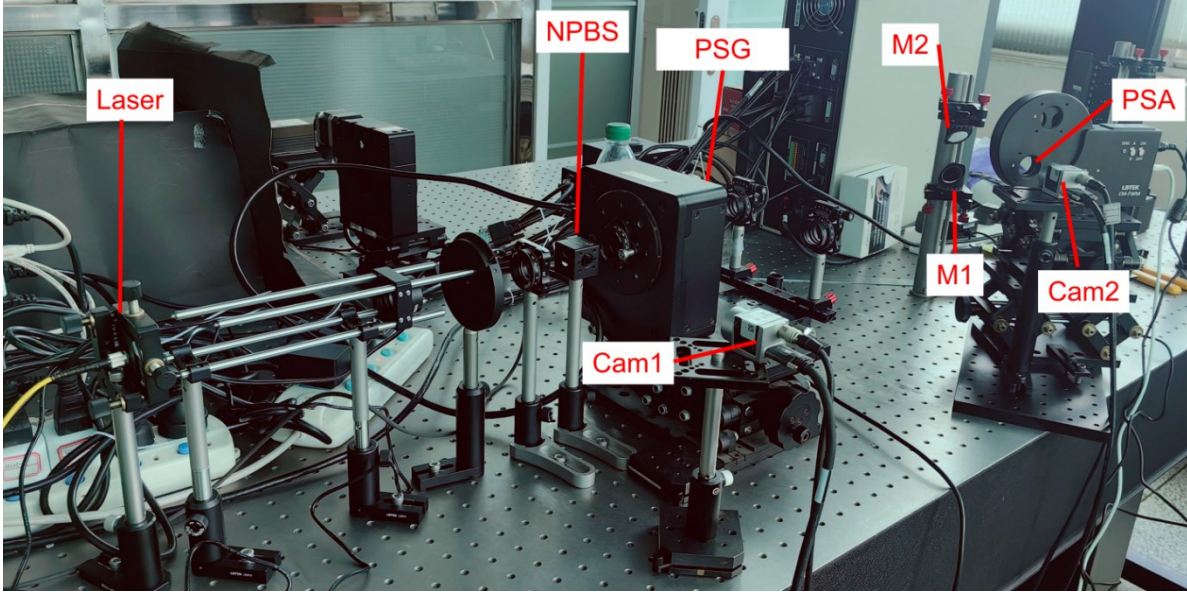


图3 实验系统实拍图

Fig. 3 Actual photograph of the experimental system

5个代表性角度(20°、30°、40°、50°、60°),每个角度下连续采集500帧穆勒矩阵数据,单次连续观测时长约30分钟,确保覆盖环境低频漂移的特征周期。

数据处理过程中,首先对原始光强信号进行预处理:通过空间均值滤波剔除图像噪声,利用同步双相机信号比值(Cam2/Cam1)抑制光源波动,随后基于六态矩阵解调原理与四点偏振定标法反演穆勒矩阵。为剥离环境干扰对重复性评估的影响,采用时域信号解耦算法:以 $3\sigma_{\text{MAD}}$ 为阈值剔除瞬态突跳噪声,通过LOESS局部加权平滑提取并扣除低频热漂移基线,最终保留仪器固有随机噪声成分。

如图4测量结果表明,在此50°位置,以各元素时域波动综合均方根(RMS)表征的穆勒矩阵测量重复性优于 1.46×10^{-4} ,方位角测量重复性优于 0.011° 。经进一步统计,全角度范围内系统的测量重复性均稳定在 10^{-4} 量级,空气穆勒矩阵实测绝对偏差仅为1.86%。这一重复性指标,严谨地定义了本实验平台在排除环境低频漂移后的物理测量极限,为后续校正算法的残差分析与精度验证提供了可靠的实验基准。

3 仪器偏振校正结果对比与定标策略寻优

实验在20°~80°指向角范围内以2°为步进,共获取29组有效穆勒矩阵实测数据,用于物理模型验证、校正方法对比及稀疏定标策略优化,全面检验所提方法在动态仪器偏振校正中的工程适用性。

3.1 物理模型的参数优化结果分析

为验证双反射镜系统物理模型对真实光学偏振特性的表征能力,基于29组全角度实测穆勒矩阵,采用非线性最小二乘法对5参数、8参数、10参数三级穆勒矩阵物理模型进行参数反演。为明确区分不同阶段的误差评价指标,本文定义:模型拟合阶段采用“拟合均方根误差 RMS_{fit} ”,表征物理模型预测值与实测穆勒矩阵之间的整体偏差;校正性能评价阶段采用“均方根误差RMSE”,表征校正后穆勒矩阵与理想单位矩阵之间的偏差。

$$\text{RMS}_{\text{fit}}(\beta) = \sqrt{\frac{1}{16N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{16} [\mathbf{M}_{\text{meas},ij}(\beta_i) - \mathbf{M}_{\text{model},ij}(\beta_i)]^2} \quad (12)$$

式中, $N=29$ 为实测角度总数,16为穆勒矩阵元素个数, $\mathbf{M}_{\text{meas}}$ 与 $\mathbf{M}_{\text{model}}$ 分别为实测与模型预测矩阵。

由表1的参数反演与拟合结果表明,5参数对称模型受强对称假设约束,无法吸收双反射镜固有偏差,全域拟合 RMS_{fit} 为 3.0639×10^{-2} ;8参数半解耦模型放开静态参数约束,拟合精度有所提升, RMS_{fit} 降至 2.8304×10^{-2} ;10参数全解耦模型独立表征两反射镜的静态偏振特性与动态相位演化规律,最大程度还原系统非理想效应,全域拟合 RMS_{fit} 最优,达到 2.7098×10^{-2} 。

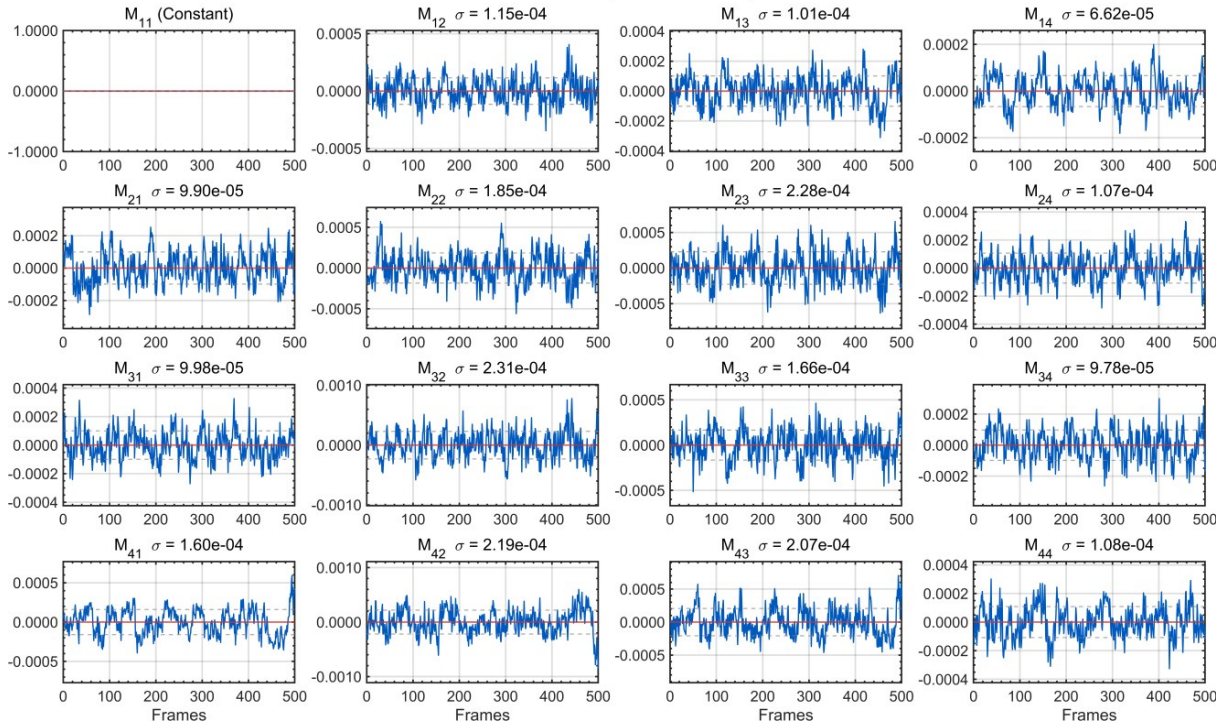


图4 50°位置时的穆勒矩阵各元素综合均方根

Fig. 4 Root mean square of all elements of the Mueller matrix at the 50° position

表1 三种穆勒矩阵物理模型的参数拟合结果汇总

Table 1 Summary of parameter fitting results for three physical models of Mueller matrices

Model	R_{s1}	R_{p1}	δ_{10}	k_{11}	k_{21}	R_{s2}	R_{p2}	δ_{20}	k_{12}	k_{22}	RMS
A	0.9514	0.9560	-3.73°	0.2016	-0.0039	0.9514	0.9560	-3.73°	0.2016	-0.0039	3.0639×10^{-2}
B	0.9567	0.9276	-4.48°	0.2009	-0.0038	0.9246	0.9637	-2.95°	0.2009	-0.0038	2.8304×10^{-2}
C	1.0000	0.9695	-11.08°	0.3968	-0.0052	0.9545	0.9949	3.53°	0.0114	-0.0026	2.7098×10^{-2}

此外,除偏振参数外,10 参数模型反演还同步提取了实验旋转台的机械定位误差(平均偏差为 -0.39°)。这不仅在可接受的实验公差范围内,更从侧面证实了该完全解耦的物理模型具备较好的二阶系统误差吸收能力。参数反演采用非线性最小二乘优化算法,各参数的初值、边界约束及拟合结果如表 2 所示。综上,10 参数模型具备最优的物理描述能力与拟合精度,可作为后续校正的基准物理模型。

表2 10 参数模型反演的参数初值、约束边界及拟合结果

Table 2 Initial values, constraint bounds, and fitting results for the 10-parameter model inversion

Parameter	R_s	R_p	δ_0	k_1	k_2
Initial value	0.978	0.949	5.00°	0.000	0.000
Upper bound	1.000	1.000	180.00°	1.000	0.010
Lower bound	0.800	0.800	-180.00°	-1.000	-0.010
Fit result (M1)	1.000	0.970	-11.08°	0.397	-0.005
Fit result (M2)	0.955	0.995	3.53°	0.011	-0.003

3.2 全域校正性能对比分析

3.2.1 校正方案与评估指标

根据真实望远镜在科学观测中定标时间受限的实际情况,设计稀疏定标对比实验。在 $20^\circ \sim 80^\circ$ 旋转范围内,以 2° 为步长密集采样,选取 20° 、 40° 、 60° 、 80° 共 4 个离散角度作为定标点,其余 25 个角度作为验证点,以此严格测试算法在广域定标盲区内的插值与预测能力。

在实际太阳望远镜观测中,单个定标点的硬件定标通常需要 5~10 分钟。传统密集定标方案在 $20^\circ \sim 80^\circ$

范围内每隔 2° 定标一次,需要31个定标点,总耗时约2.5~5小时。本文MGRI方法仅需4个定标点,定标总耗时约20~40分钟,可节约约90%的定标时间。

对比三种校正策略:基于4个定标点的传统逐元素线性插值法(方法A)、基于10参数物理模型的纯解析预测法(方法B)、本文提出的物理模型引导残差插值混合法(方法D, MGRI)。采用三项互补指标综合评判校正效果。

1) 全域综合RMSE:校正后穆勒矩阵与理想单位矩阵 I_4 的整体偏差,覆盖全部16个元素,逐角度与全域的定义分别为

$$\text{RMSE}(\beta) = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i,j=1}^4 [M_{\text{corr},ij}(\beta) - \delta_{ij}]^2} \quad (13)$$

$$\text{Global RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{RMSE}(\beta_k)^2} \quad (14)$$

2) 仪器偏振残差IP:非量化非偏振光经系统后产生的虚假偏振信号强度,定义为

$$\text{IP} = \sqrt{m_{10}^2 + m_{20}^2 + m_{30}^2} \quad (15)$$

3) 偏振串扰XT:量化Q/U/V偏振分量间的交叉泄漏强度,定义为

$$\text{XT} = \sqrt{\frac{1}{6} (m_{12}^2 + m_{13}^2 + m_{21}^2 + m_{23}^2 + m_{31}^2 + m_{32}^2)} \quad (16)$$

3.2.2 仪器偏振校正结果与对比分析

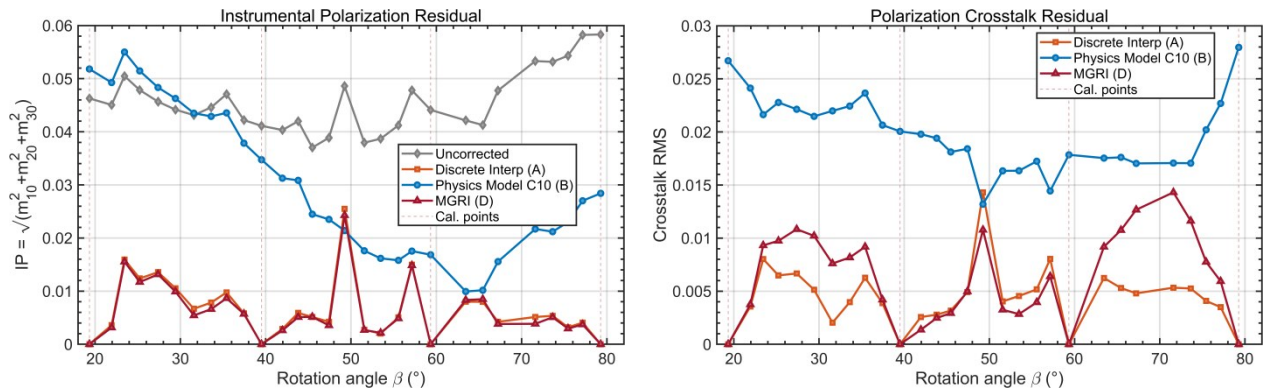


图5 校正结果。(a)仪器偏振(IP)残差随角度分布;(b)偏振串扰(Crosstalk)残差随角度分布

Fig. 5 Corrected result. (a) Instrumental Polarization (IP) residuals as a function of angle; (b) Polarization crosstalk residuals as a function of angle

未校正状态下,系统受动态仪器偏振影响显著,仪器偏振IP均值高达0.0453,偏振测量存在严重失真。三种校正策略的全域性能对比如表3所示。

表3 三种仪器偏振校正策略的全域校正性能对比

Table 3 Comparison of the global calibration performance of three instrument polarization correction strategies				
Calibration method	Mean IP	Mean crosstalk XT	Global RMSE	IP suppression rate
Uncalibrated	0.0453	0.4574	0.5114	—
Discrete interp (A)	0.0077	0.0052	0.0193	83.0%
Physics model C10 (B)	0.0298	0.0193	0.0252	34.2%
MGRI (D)	0.0073	0.0074	0.0070	84.0%

三种方法的全域校正结果如表3与图5、图6所示。传统线性插值可在定标点处实现误差归零,但在非定标盲区因穆勒矩阵强非线性变化出现明显误差抬升,全域RMSE为0.0193,IP抑制率为83.0%。纯物理模型预测可输出连续平滑的全域结果,但受系统固有偏差影响,校正残差偏高,IP抑制率仅34.2%,全域RMSE为0.0252。本文MGRI方法通过物理模型吸收非线性趋势,在残差空间实现稳健插值,在全角度范

围内保持平稳低残差分布,无明显盲区误差跳变,全域RMSE低至0.0070,较传统插值降低64.0%,IP均值降至0.0073,抑制率达84.0%,综合校正性能显著优于对比方法。

从表3可见,离散线性插值法(方法A)在偏振串扰XT指标上略优于MGRI方法(方法D)。这是因为线性插值在定标点附近具有较好的局部平滑性,对穆勒矩阵非对角元素(即 Q 、 U 、 V 分量间的相互串扰项)的快速振荡具有低通滤波效果。然而,方法A在全域RMSE和仪器偏振IP指标上显著劣于MGRI方法,表明其在非定标点盲区存在较大的系统性偏差。MGRI方法通过物理模型约束全域一致性,虽然偏振串扰XT略高于方法A,但综合校正性能更优,更适合实际工程应用。

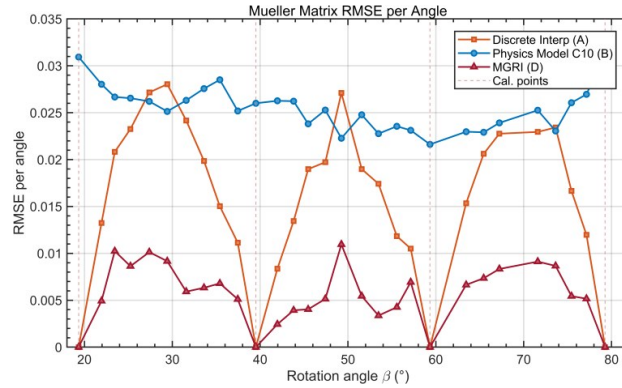


图6 穆勒矩阵RMSE逐角度分布

Fig. 6 RMSE distribution of mueller matrix by angle

3.3 稀疏定标策略优化

为得到最优稀疏定标方案,分别从定标点数量与位置两个维度开展系统性寻优,在最小化定标时间损耗的同时实现最高校正精度。

3.3.1 定标点数量优化

在 $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内设置2~7个均匀分布定标点,其余角度作为验证点。图7结果表明,MGRI方法对定标点数量具有更强的鲁棒性,仅采用2个定标点时全域RMSE即可达到0.0203,精度优于传统插值法使用4个定标点的效果;当定标点增至4个时,校正精度快速收敛至0.0070,为效率与精度的最优性价比拐点;定标点数量超过6个后,全域RMSE基本稳定在0.0050,校正性能进入饱和阶段,继续增加定标点精度提升微弱,反而会显著占用科学观测时间。

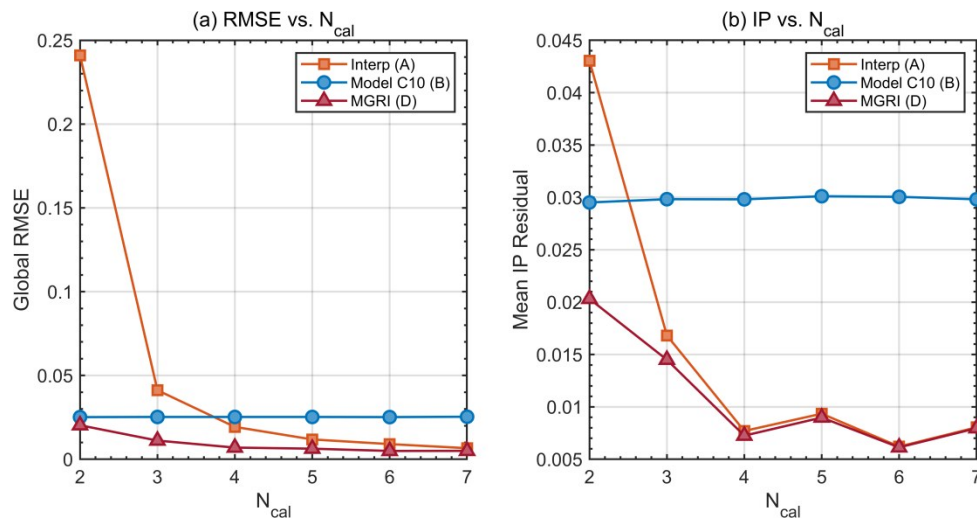


图7 定标点数量对校正精度的影响

Fig. 7 The impact of the number of calibration points on correction accuracy

3.3.2 定标点位置优化

如图8所示结果,通过固定4个定标点,对比7组典型位置方案,并对351种内部点组合进行穷举搜索。首先,在固定工作区间端点(20° 与 80°)的前提下,对内部两个定标点进行全局穷举搜索,得到该约束下的最优组合为 $[20^\circ, 38^\circ, 64^\circ, 80^\circ]$,RMSE降至0.0062;然而,若打破端点固定约束,采用适度内缩的优化方案 $[24^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 76^\circ]$,可进一步规避边界区间的插值发散,使全域RMSE降低至0.0059,较标准均匀方案(0.0070)精度提升15.3%。

实验结果验证,均匀或近均匀分布是稀疏定标的最优布局原则,定标点向两端聚集会导致中间盲区插值误差急剧增大。综合数量与位置优化结果,工程观测推荐采用4点均匀或内缩分布方案,可在最少定标时间与次数消耗下实现全域动态仪器偏振的高精度、高鲁棒性校正。

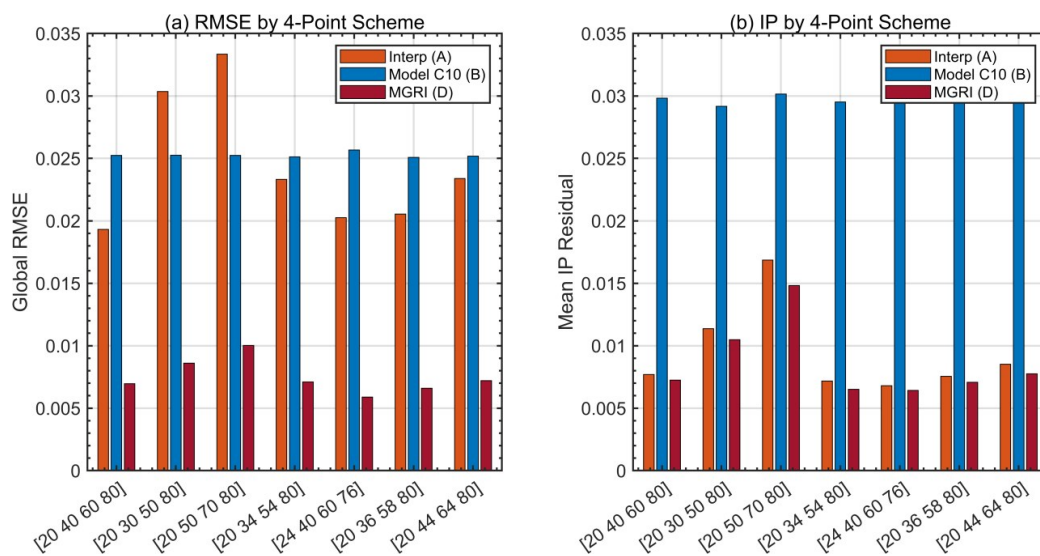


图8 穷举搜索最优4点定标组合

Fig. 8 Exhaustive search for the optimal 4-point calibration combination

4 结论

本文针对地平式大口径太阳望远镜稀疏定标条件下的偏振校正难题,提出物理模型引导残差插值(MGRI)混合校正框架。基于室内双反射镜等效实验平台的验证表明,利用10参数解耦物理模型结合4个离散定标点,该方法在 $20^\circ \sim 80^\circ$ 指向角范围内可将全域穆勒矩阵RMSE降至0.0070,仪器偏振抑制率达84.0%。相比传统密集定标,该方法在减少定标频次、节约观测时间的同时,提升了动态仪器偏振校正精度与鲁棒性。

本文实验主要聚焦于验证由核心镜组旋转引入的动态偏振效应,以室内双反射镜平台为仿真验证系统,核心在于实测反射偏振变换特性,暂未引入真实望远镜系统中复杂的透射光学元件、滤光片以及制造装调误差等因素。后续计划依托1.8米中国大型太阳望远镜(CLST)开展实测,将全链路透反射元件与热漂移等实际因素纳入,完成模型迭代与算法优化。同时,面向太阳观测宽波段应用需求,后续可结合复折射率色散经验公式或特征谱线独立定标策略,进一步提升MGRI方法的多波长适用性。本研究通过室内等效实验验证了MGRI方法在稀疏定标条件下的有效性,为大口径太阳望远镜高效率、高精度偏振测量提供了兼具理论支撑与实用价值的工程方案。

参考文献

- [1] LI Wenxian, TIAN Hui. Measurements of the solar magnetic fields[J]. Chinese Journal of Nature, 2022, 44(1): 19-30.
李文显, 田晖. 太阳磁场测量[J]. 自然杂志, 2022, 44(1): 19-30
- [2] HARRINGTON D M, SUEOKA S R, SCHAD T A, et al. Systems approach to polarization calibration for the Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST)[J]. Solar Physics, 2023, 298(1): 10.
- [3] LIU Zhong, XuJUN, GUO Bozhong, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6): 705.

- [4] RAO Changhui, GU Naiting, ZHU Lei, 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.
- [5] FU Yu, YUAN Shu, JIN Zhenyu, et al. Polarization optical design of 8-meter Chinese giant solar telescope[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2023, 47(3): 659-677.
- [6] YUAN Shu. Polarization model for the New Vacuum Solar Telescope[J]. Solar Polarization 7, 2014, 489: 297.
- [7] RAO Changhui, GU Naiting, RAO Xuejun, et al. First light of the 1.8-m solar telescope - CLST[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 63(10): 109631.
- [8] YAO Benxi, RAO Changhui, GU Naiting. Polarization calibration unit design of 1.8 m Chinese large solar telescope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(11): 180058.
- [9] RAO Changhui, ZHONG Libo, GUO Youming, et al. Astronomical adaptive optics: a review[J]. Photonix, 2024, 5(1): 16.
- [10] GU Naiting, LI Cheng, SHA Xiaoming, et al. Passive control of the temperature homogeneity for the primary mirror surface of large ground-based solar telescopes[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2019, 5(4): 1-9.
- [11] GU Naiting, LI Cheng, CHENG Yuntao, et al. Thermal control for light-weighted primary mirrors of large ground-based solar telescopes[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2019, 5(1): 014005.
- [12] YAN Zhiwu, GU Naiting, LIU Yangyi, et al. Modeling and experiment validation of thermal control for the heat-stop of the chinese large solar telescope [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2021, 7(3): 038003.
- [13] XIONG Zhuangjing, GU Naiting, XIAO Yawei, et al. High-precision calibration of the DKDP modulator for polarization measurement in solar telescopes[J]. Optics Express, 2025, 33(7): 16425-16441.
- [14] YAO Benxi, GU Naiting, RAO Changhui. Optical compensation of the Chinese Large Solar Telescope instrumental polarization[J]. Journal of Optical Technology, 2018, 85(10): 639-643.
- [15] HOU Junfeng, WANG Dongguang, DENG Yuanyong, et al. Error analysis and optimal design of polarization calibration unit for solar telescope[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(8): 089501.
- [16] ELMORE D. Telescope calibration using polarization calibration data[J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 331(6): 655-657.
- [17] HOU Junfeng, XU Zhi, YUAN Shu, et al. Spectro-polarimetric observations at the NVST: I. instrumental polarization calibration and primary measurements[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(4): 045.
- [18] HOFMANN A, ARLT K, BALTHASAR H, et al. The GREGOR polarimetric calibration unit[J]. Astronomische Nachrichten, 2012, 333(9): 854-862.
- [19] HARRINGTON D M, SUEOKA S R. Polarization modeling and predictions for Daniel K. Inouye Solar Telescope part 1: telescope and example instrument configurations[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2017, 3(1): 018002.
- [20] HARRINGTON D M, SUEOKA S R. Polarization modeling and predictions for DKIST part 3: focal ratio and thermal dependencies of spectral polarization fringes and optic retardance[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2018, 4(1): 1-55.
- [21] BECK C, SCHLICHENMAIER R, COLLADOS M, et al. A polarization model for the german vacuum tower telescope from in situ and laboratory measurements[J]. Astronomy and Astrophysics, 2005, 443(3): 1047-1053.
- [22] SKUMANICH A, LITES B W, PILLET V M, et al. The calibration of the advanced stokes polarimeter[J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 1997, 110(2): 357-380.

Sparse Calibration Method for Instrumental Polarization of Solar Telescopes Based on Model-Guided Residual Interpolation

ZHANG Hefei^{1,2,3,4}, ZHOU Qianhan^{1,2,3,4}, YANG Jinsheng^{1,2}, LIANG Fengyi^{1,2,3}, ZHANG Lan-qiang^{1,2,3}, RAO Changhui^{1,2,3}

(1 National Key Laboratory of Adaptive Optics, Chengdu 610209, China)

(2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Modern large-aperture alt-azimuth solar telescopes suffer from severe dynamic Instrumental Polarization (IP) caused by the relative rotation of optical elements during tracking. Resolving the inherent contradiction between the long observation time occupied by dense hardware calibration and the high-precision requirements of polarization measurements remains a critical challenge. Under sparse calibration conditions, conventional numerical interpolation methods fail to accurately reconstruct the highly nonlinear evolution of IP in non-calibrated blind zones, while pure physical models struggle to account for unknown microscopic asymmetric errors. Therefore, the objective of this study is to propose and validate a Model-Guided Residual Interpolation (MGRI) hybrid calibration framework. By integrating a multi-parameter decoupled physical model with sparse calibration data, this paper aims to provide a high-fidelity, full-pointing-angle polarization correction solution that minimizes hardware calibration time while maximizing IP suppression accuracy for ground-based solar observation facilities. To achieve this objective, a comprehensive theoretical model and an experimental validation methodology are formulated. Based on Fresnel reflection theory and coordinate transformation matrices, a physical Mueller matrix model characterizing the dynamic IP of the telescope is established. Departing from the traditional ideal symmetric assumption, a fully decoupled 10-parameter physical model is proposed. This model assigns independent static polarization parameters (reflectance and initial phase) and dynamic phase evolution coefficients to each configuration mirror, capturing the inherent physical manufacturing asymmetries between the optical components. Building on this physical baseline, the MGRI algorithm is designed. The hybrid framework initially utilizes the 10-parameter model to absorb the high-frequency nonlinear polarization trends driven by geometric rotations. Subsequently, utilizing a limited number of sparse hardware calibration points, linear interpolation is performed on the smoothed residual matrix to compensate for low-frequency systematic deviations, finally yielding the reconstructed full-domain correction matrix. To rigorously validate the proposed theoretical framework, an equivalent indoor double-reflector dynamic polarization platform is constructed using a 532 nm laser. A synchronous dual-camera detection scheme, combined with a six-state polarization demodulation algorithm, is employed to execute high-precision empirical Mueller matrix measurements, thereby establishing a strict operational baseline for evaluating the sparse calibration algorithms. Experimental results systematically demonstrate the performance and efficiency of the proposed MGRI framework. Initial baseline stability tests confirm that the temporal measurement repeatability of the experimental system achieves a Root Mean Square (RMS) precision superior to 1.46×10^{-4} . Parameter inversion indicates that the 10-parameter fully decoupled model effectively absorbs the physical differences between the mirrors, reducing the global fitting root-mean-square error (RMS_{fit}) to 2.71×10^{-2} . In an applied operational context within the $20^\circ - 80^\circ$ pointing range, traditional dense calibration mandates 31 pointing measurements and consumes approximately 2.5 to 5 hours. Conversely, the MGRI method requires only 4 discrete calibration points, demanding 20 to 40 minutes and effectively saving approximately 90% of calibration time. Evaluated under these sparse conditions, the MGRI framework successfully mitigates the truncation errors associated with standard discrete interpolation. Quantitatively, the global Mueller matrix RMSE is reduced from 0.0193 (pure linear interpolation) to 0.0070, corresponding to a 64.0% suppression in residual error. Alongside this, the mean magnitude of instrumental polarization is suppressed by 84.0%, decreasing from an uncorrected level of 0.0453 to 0.0073, while interrelated polarization crosstalk is also inhibited. Furthermore, comprehensive parameter-scanning strategy evaluation indicates that altering the specific selection of calibration points from a standard uniform distribution to an inward-contracted spatial topology (e.g., $[24^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 76^\circ]$) prevents boundary interpolation divergence. This structural optimization further lowers the global RMSE to 0.0059, yielding a 15.3% accuracy enhancement relative to standard fixed-endpoint selection schemes. The proposed MGRI framework provides a robust and highly efficient engineering paradigm that resolves the tension between dynamic IP correction accuracy and limited scientific observation windows in large-aperture solar telescopes. While the current methodology is validated on the core geometric rotation mechanism, future research will transition to on-sky operations utilizing the 1.8-meter Chinese Large Solar Telescope (CLST). Real-condition optimizations will extend the physical model constraints to incorporate full-chain transmissive and reflective elements, as well as environmental thermal drift factors. Additionally, to accommodate broadband observational requirements, subsequent efforts will extend the wavelength applicability of the MGRI method by integrating empirical complex refractive index dispersion formulas or by executing independent calibration procedures across distinct targeted solar spectral lines.

Key words: Solar telescope; Instrumental polarization; Polarization correction; Polarization calibration; Mueller matrix

OCIS Codes: 120.5410; 110.6770; 260.5430

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0812001