

# 基于双光束检偏的波片测量系统

彭建国<sup>1,2</sup>, 袁沐<sup>1\*</sup>, 金振宇<sup>1</sup>, 季凯帆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 大口径太阳望远镜中常用波片来进行偏振定标和偏振测量, 为了对这类波片的延迟量和方位角进行准确测量, 提出一种基于双光束检偏的波片测量系统, 建立了该系统对应的数学模型。测量系统中检偏器的方位角可作为参数进行拟合, 克服了单光束测量系统中检偏器方位角误差的影响; 同时, 根据测量系统的结构, 对待测波片的延迟量范围进行分析, 实现了对偏振定标和偏振测量中所使用波片的精确测量。分析了测量系统误差的主要来源, 包括光源光强噪声、电机定位误差和探测器非线性响应, 并对探测器非线性响应进行了校正。该方法测量 1/4 波片和 127° 波片的延迟量和方位角误差小于 0.02°, 测量 27°~145° 和 215°~333° 范围波片样品的延迟量和方位角误差小于 0.05°。

**关键词** 测量; 波片; 延迟量; 双光束检偏; 非线性响应

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0912002

## Accurate Parameter Measurement of Wave Plate Based on the Dual-Beam Polarization Analyzer Configuration

Peng Jianguo<sup>1,2</sup>, Yuan Shu<sup>1\*</sup>, Jin Zhenyu<sup>1</sup>, Ji Kaifan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

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

**Abstract** A wave plate is commonly used for polarization measurement and polarization calibration of a large solar telescope. In this study, we developed a measurement system based on the dual-beam polarization analyzer configuration to measure the phase retardance and azimuth angle of the wave plate, and derived the corresponding mathematical model. The influence of azimuth error of the polarizer in the single beam measurement system was overcome by fitting the azimuth of the polarizer. At the same time, we analyzed the retardance range of the measuring plate, and accurately measured the wave plate used in polarization calibration and polarization measurement. Finally, we analyzed the main error sources of the system, including the power noise of the light source, position error of the rotating stage, and nonlinear response of the detector. Subsequently, we corrected the detector's nonlinear response after calibration. The measurement errors of phase retardance and azimuth angle are within 0.02° for a quarter-wave plate and a wave plate with phase retardances of 127°. The retardance and azimuth errors are less than 0.05° for the wave plates with phase retardances of 27°–145° and 215°–333°.

**Key words** measurement; wave plate; retardance; dual-beam polarization; nonlinear response

**OCIS codes** 120.5410; 260.2130; 260.5430

## 1 引 言

1 m 新真空太阳望远镜(NVST)是我国目前口径最大的太阳望远镜, 对太阳磁场的偏振观测是该望远镜的主要科学目标之一<sup>[1]</sup>。在太阳偏振观测中, 偏振测量的结果会受到望远镜偏振特性

的影响, 因此, 在偏振观测前需要对望远镜偏振特性进行测量和定标。NVST 中, 在望远镜的副镜后安装有偏振定标单元, 在望远镜库德焦点前安装有偏振分析器, 用于实现对望远镜的偏振定标以及太阳偏振观测<sup>[2-5]</sup>。望远镜的偏振定标单元中使用了偏振片和 1/4 波片, 用于调制出已知状

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-01-16; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(11833010, 11773069, 11873091)、云南省基础研究计划重点项目(2019FA001)

\* E-mail: yuanshu@ynao.ac.cn

态的偏振光,而偏振分析器中用到了 127°波片和偏振片,用于测量经过望远镜后光的偏振状态<sup>[3-4]</sup>。目前,很多太阳望远镜都使用了 1/4 波片和 127°波片来进行望远镜的偏振定标和偏振观测<sup>[6-8]</sup>,由于制造工艺等因素的限制,这些波片的实际延迟量往往相对于 90°或 127°有一定的偏差,故对这些波片实际延迟量的精确测量十分重要。而且在偏振定标单元和偏振分析器中,波片快轴相对于偏振片透过轴的方位角也需要提前测得。因此,研究这两类波片的相位延迟量和快轴方位角(相对于偏振片透过轴)的测量方法具有重要意义,本文主要分析对这两类波片延迟量和快轴方位角进行精确测量的方法。

目前,波片参数测量的方法主要有光谱扫描法、补偿法、干涉法、光强调制法和椭偏测量法等<sup>[9-15]</sup>,这些测量方法都有各自的适用范围和优缺点。光谱扫描法、补偿法和干涉法无法对波片的快轴方位角进行准确测量,光强调制法容易受到探测器非线性响应及元件对准误差的影响,椭

偏测量法则需要对椭偏仪自身先进行高精度的定标。

本文根据光强调制法,采用起偏器-样品-双光束检偏器的结构,在调制过程中同时测量两个检偏通道的光强,实现了对偏振元件方位角的拟合,克服了元件方位角对准误差对测量结果造成的影响。同时,对探测器的非线性响应进行了测量和校准,克服了非线性响应对测量结果的影响。

## 2 测量原理与实验方案

### 2.1 测量原理介绍

图 1 为波片延迟量与方位角测量系统的原理图,光源发出的光经过准直后依次进入起偏器、旋转波片、检偏器,最后到达探测器。取起偏器的透过轴方向为参考,波片快轴的初始方位角为  $\theta_0$ ,检偏 Wollaston 棱镜出射两个通道的方位角分别为  $\theta_p$  和  $\theta_p + 90^\circ$ 。测量过程中,起偏棱镜和检偏棱镜固定,电机带动波片以  $3^\circ$  为步长旋转  $360^\circ$ ,两个检偏通道的光功率计在对应位置采集光强。

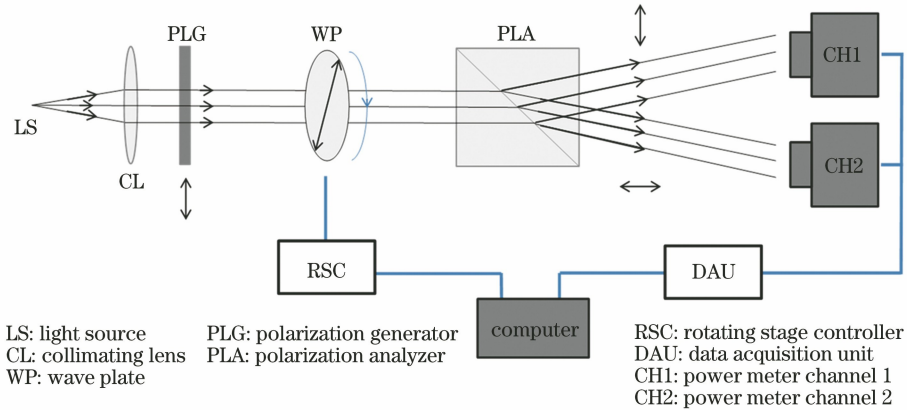


图 1 测量系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system

根据偏振光的 Stokes 参量和偏振元件的 Mueller 矩阵,可得两个通道探测光强为

$$\begin{cases} I^{ch1} = g_1 \langle \mathbf{e} | \mathbf{M}_{P_2}(\theta_p) \mathbf{M}_{WP}(\delta, \theta_i, \psi) \mathbf{M}_{P_1}(0) | \mathbf{e} \rangle I_0, \\ I^{ch2} = g_2 \langle \mathbf{e} | \mathbf{M}_{P_2}(\theta_p + 90^\circ) \mathbf{M}_{WP}(\delta, \theta_i, \psi) \mathbf{M}_{P_1}(0) | \mathbf{e} \rangle I_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为入射光强;  $|\mathbf{e}\rangle = [1, 0, 0, 0]^T$  为 Stokes 矢量;  $\mathbf{M}_{P_1}(0)$  为起偏器的 Mueller 矩阵;  $\mathbf{M}_{WP}(\delta, \theta_i, \psi)$  为待测波片的 Mueller 矩阵,  $\delta, \theta_i$  和  $\psi$  分别是波片延迟量、方位角和二向色角;  $\mathbf{M}_{P_2}(\theta_p)$  为检偏器的 Mueller 矩阵,  $\theta_p$  为检偏器的方位角, 偏振元件的 Mueller 矩阵表达式参见文献<sup>[14, 16-17]</sup>;  $\langle \mathbf{e} | = [1, 0, 0,$

$0]$  为光强响应矢量;  $g_1, g_2$  为探测器光强响应系数。

将各偏振元件的 Mueller 矩阵代入(1)式, 取  $I'_0 = g_1 I_0, g = g_2/g_1$ , 则  $g_2 I_0 = g I'_0$ 。计算可得两个通道最后的探测光强表达式为

$$\begin{cases} I_i^{\text{ch1}} = \frac{1}{2}I'_0 \{1 - \cos 2\psi \cos 2\theta_i + \cos 2\theta_p (-\cos 2\psi \cos 2\theta_i + \cos^2 2\theta_i + \sin 2\psi \cos \delta \sin^2 2\theta_i) + \\ \sin 2\theta_p [-\cos 2\psi \sin 2\theta_i + (1 - \sin 2\psi \cos \delta) \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i]\}, \\ I_i^{\text{ch2}} = \frac{1}{2}gI'_0 \{1 - \cos 2\psi \cos 2\theta_i - \cos 2\theta_p (-\cos 2\psi \cos 2\theta_i + \cos^2 2\theta_i + \sin 2\psi \cos \delta \sin^2 2\theta_i) - \\ \sin 2\theta_p [-\cos 2\psi \sin 2\theta_i + (1 - \sin 2\psi \cos \delta) \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i]\}, \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i$  为波片旋转的步数 ( $i = 0, 1, 2, \dots, 120$ )；波片方位角  $\theta_i = \theta_0 + 3i \times 1^\circ$ ， $\theta_0$  为旋转波片的初始方位角。

### 2.2 实验方案

根据图 1 所示的结构，在实验室搭建了对应的波片测量系统。实验中采用的光源为白光光源，准直后经过 532 nm 的干涉滤光片，再以平行光依次通过起偏 Glan-Thompson 棱镜、待测波片和检偏

Wollaston 棱镜，从 Wollaston 棱镜出射的两束光的偏振状态相互垂直，分别进入光功率计的通道 1 和通道 2。光源稳定后起伏小于 0.001，旋转波片的电机定位精度为  $0.03^\circ$ 。根据偏振棱镜的参数，起偏棱镜的消光比大于 100000:1，检偏棱镜的消光比大于 20000:1，这两个元件相对于理想元件的偏差很小，这里将其看作是理想偏振片。图 2 为测量系统对应的实物图。

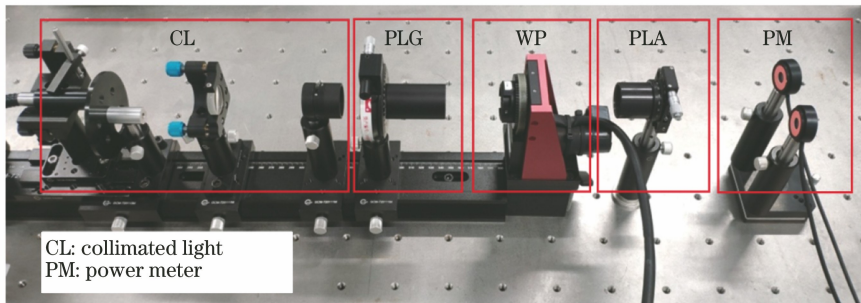


图 2 测量系统实物图

Fig. 2 Photograph of the measurement system

测量开始前，先将检偏器的方位角调节至  $45^\circ$  附近(相对于起偏器来说)，该方位角是根据测量波片的拟合参数对随机误差的敏感程度来选取的。图 3 是雅克比矩阵条件数的倒数 ( $1/\text{cond } \mathbf{J}$ ) 随测量波片延迟量和检偏器方位角的关系，雅克比矩阵的条件数越大，系统越不稳定，拟合结果越容易受到误差的影响。因此，当测量样品延迟量为  $0^\circ$  或  $180^\circ$  的整数倍，或者检偏器方位角为  $0^\circ$  或  $90^\circ$  的整数倍时，拟合参数对误差十分敏感。

图 4 给出  $90^\circ$  波片和  $127^\circ$  波片拟合参数误差对光强随机误差敏感程度的蒙特卡罗分析结果，图中横坐标为检偏器方位角，纵坐标为各角度误差的模拟结果。该结果与图 3 中雅克比矩阵条件数的分析结果一致，即检偏器的方位角在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的整数倍附近时，拟合参数对误差很敏感。根据图 4 中的误差模拟结果，检偏器在  $20^\circ \sim 70^\circ$  或  $120^\circ \sim 160^\circ$  范围内各拟合参数受测量误差的影响较小，最终选取检偏器在  $45^\circ$  附近进行测量。

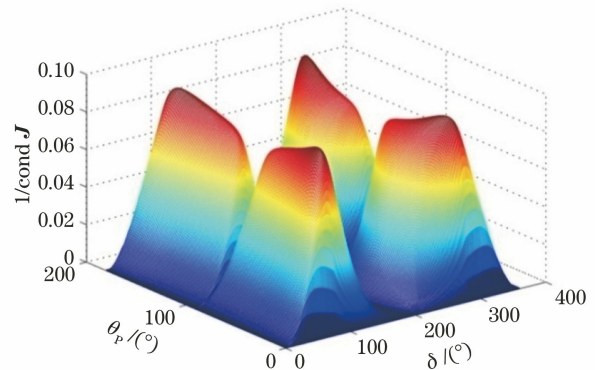


图 3 测量系统雅克比矩阵的条件数 ( $\text{cond } \mathbf{J}$ )

Fig. 3 Condition number ( $\text{cond } \mathbf{J}$ ) of Jacobian matrix for measurement system

测量过程中，用开发的 LabVIEW 程序进行控制和采集，程序控制电机带动波片以  $3^\circ$  为步长进行旋转，每步旋转到位后两个通道的探测器同步采集对应光强，光强采集后电机再旋转到下一位置，依次完成  $360^\circ$  的旋转和对应光强的采集，完成一组测量所需要的时间小于 1 min。

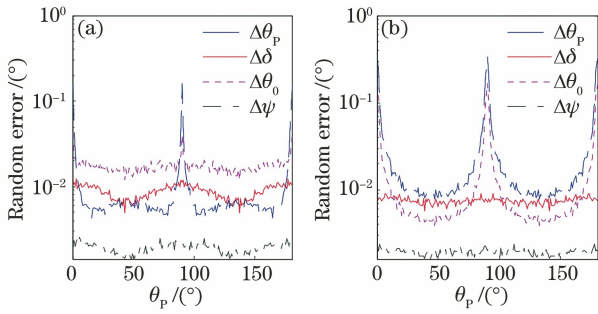


图 4 拟合随机误差与检偏器方位角的关系。

(a) 90°波片; (b) 127°波片

Fig. 4 Relationship between fitting random error and azimuth angle of polarization analyzer. (a) 90° wave plate; (b) 127° wave plate

采集完成后,根据(2)式对采集得到的一系列光强进行最小二乘拟合,即可获得待拟合的参数( $I'_0$ ,  $g$ ,  $\theta_p$ ,  $\delta$ ,  $\theta_0$ ,  $\psi$ ),其中波片延迟量  $\delta$ 、方位角  $\theta_0$  和二向色角  $\psi$  为待测波片的参数。最小二乘拟合的公式表示为

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{120} [(I_i^{\text{meas1}} - I_i^{\text{ch1}})^2 + (I_i^{\text{meas2}} - I_i^{\text{ch2}})^2], \quad (3)$$

式中: $I_i^{\text{meas1}}$ 、 $I_i^{\text{meas2}}$ 、 $I_i^{\text{ch1}}$  和  $I_i^{\text{ch2}}$  分别为通道 1 和通道 2 的测量光强和拟合光强; $\chi^2$  为残差,反映拟合程度。

### 3 误差分析

根据实验系统的结构,对误差主要来源进行分析。随机误差主要由光源光强噪声和电机定位的随机误差引入,系统误差的主要来源是探测器的非线性响应。

#### 3.1 随机误差的分析

图 5 是光源稳定后测得的光强随机噪声,图中横坐标为时间,纵坐标是对应的光强。光源稳定后,一个测量周期内光强噪声的标准差为  $4 \times 10^{-5} \mu\text{W}$ ,光强噪声为总光强的 0.034%,光强最大起伏小于总光强的 0.1%。测量中,采用的旋转电机为直流伺服电机,电机的定位精度高于  $0.03^\circ$ 。

针对本实验系统,采用蒙特卡罗法对光强和电机误差的影响进行了模拟。下面是待测波片延迟量从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  时,0.034% 的光强随机误差和  $0.03^\circ$  的电机定位随机误差对应的各拟合参数误差的分析。

图 6 为误差模拟的结果,横坐标为待测波片的延迟量,纵坐标对应各项拟合参数的随机误差。图 6(a)是光强随机误差造成的延迟量、二向色角和方位角的拟合误差,图 6(b)是光强随机误差造成的光强和响应系数的拟合误差,图 6(c)是电机定位的

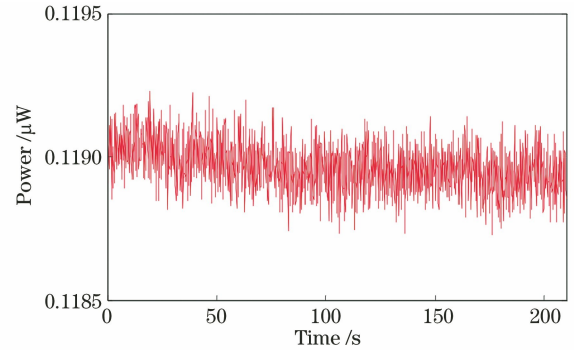


图 5 光源光强随机噪声的测量结果

Fig. 5 Measured random power noise of light source

随机误差造成的延迟量、二向色角和方位角的拟合误差,图 6(d)是电机定位的随机误差造成的光强和响应系数的拟合误差。

该误差模拟的结果与图 3 中雅克比矩阵条件数随延迟量的关系相对应,即在测量样品延迟量为  $0^\circ$  或  $180^\circ$  的整数倍时,拟合参数对误差十分敏感。由图 6 中的结果可得,光强随机误差对最后的测量误差起主导作用。综合考虑光强随机误差和电机定位误差的影响后,取波片延迟量和方位角拟合的随机误差小于  $0.05^\circ$  为参照,得到适合该系统测量的波片延迟量范围为  $27^\circ \sim 145^\circ$  和  $215^\circ \sim 333^\circ$ 。针对本系统的测量目标 1/4 波片和  $127^\circ$  波片,延迟量和方位角拟合的随机误差小于  $0.02^\circ$ 。

#### 3.2 系统误差的分析

由于光强调制法是根据调制后测得的光强来计算样品的延迟量,因此探测器非线性响应造成的光强探测偏差也会引入相应的误差,接下来对探测器非线性响应的影响进行分析。探测器非线性响应可以表示为

$$I_{\text{meas}} = a_0 + a_1 I_{\text{in}} + a_2 I_{\text{in}}^2 + \dots \quad (4)$$

一般探测器三阶及以上响应的影响很小,可以忽略<sup>[13]</sup>。

由于实验采用的光功率计的响应不受入射光偏振状态的影响,这里采用马吕斯定律对光功率计的非线性响应进行测量和校正。测量探测器非线性中用到的起偏器的消光比为 100000:1,检偏器的消光比大于 5000:1,光源起伏小于 0.1%,电机定位精度高于  $0.03^\circ$ 。

图 7 给出两个探测通道归一化的输入光强和探测光强拟合的结果,图 7(a)和图 7(b)为采用线性拟合的曲线和残差,图 7(c)和图 7(d)为采用二阶多项式拟合的曲线和残差。图中横坐标均为归一化后的输入光强,图 7(a)和图 7(b)中纵坐标为归一化后的

测得光强,图 7(c)和图 7(d)中为对应的光强拟合残差。从图 7(b)中可以看到,采用线性拟合时,通道 1 的最大残差为 0.41%,标准差为 0.19%,通道 2 的最大残差为 0.25%,标准差为 0.10%,但是输入光强较小时的残差基本都小于 0,而光强较大时的残差基本大于 0,残差具有系统性。图 7(d)中为采用二阶

多项式拟合后的残差,通道 1 的最大残差为 0.36%,标准差为 0.11%,通道 2 的最大残差为 0.19%,标准差为 0.08%,其残差在整个光强探测范围内基本分布在 0 附近。采用三阶或者更高阶多项式拟合时,拟合的均方根误差(RMSE)没有明显的减小,因此本研究主要考虑二阶及二阶以下效应的影响。

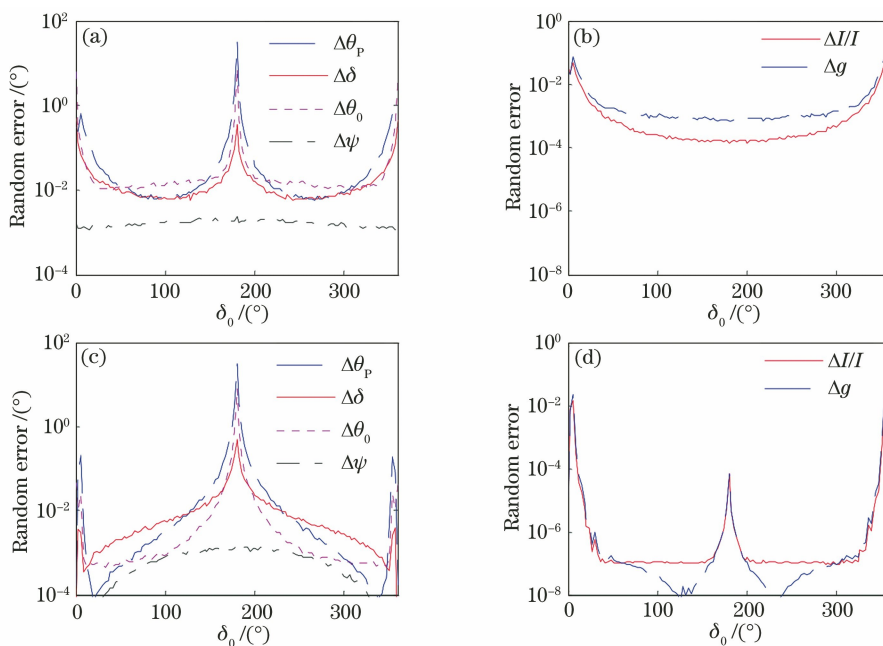


图 6 测量系统随机误差对拟合参数误差的模拟。(a)(b)光强随机误差的影响;(c)(d)电机定位随机误差的影响

Fig. 6 Simulation of random error on fitting parameter errors for measurement system. (a)(b) Random error of intensity; (c)(d) random error of positioning

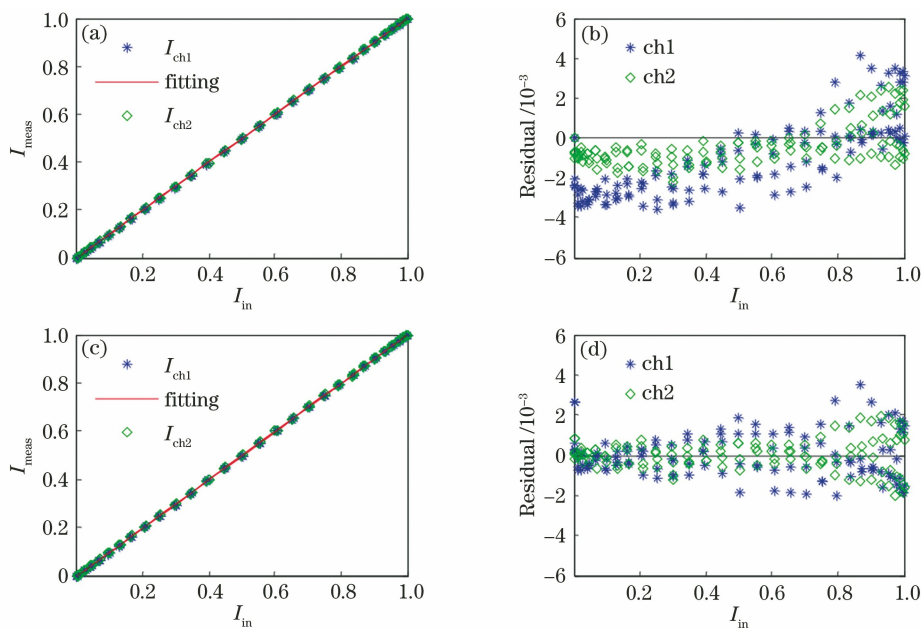


图 7 探测器非线性响应的拟合及残差。(a)(b)线性拟合及残差;(c)(d)非线性拟合及残差

Fig. 7 Fitting and residual of the nonlinear response for power meter. (a)(b) Linear fitting and residual; (c)(d) nonlinear fitting and residual

用二阶多项式拟合得到通道 1 的非线性系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别为  $-0.0018$ 、 $0.9956$ 、 $0.0071$ ，探测器响应的本底及二阶响应系数分别可以表示为  $a_0 = -0.0018$  和  $a_2 = 0.0071$ 。通道 2 的非线性系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别为  $-0.0009$ 、 $0.9980$ 、 $0.0032$ ，通道 2 的非线性响应小于通道 1。通道 1 探测器本底噪声造成的光强偏差为  $0.18\%$ ，二阶响应造成的最大光强偏差为  $0.71\%$ 。根据上面非线性响应系数进行模拟可得，对  $1/4$  波片样品，非线性响应可造成  $0.4^\circ$  延迟量的拟合误差。该因素造成的系统误差远大于其他因素的影响，因此，在实验数据的处理中需根据测得的响应系数，先对探测器的非线性响应进行校正。

#### 4 实验测量结果

实验中对  $1/4$  波片进行了测量，根据(2)式和(3)式对测得的数据进行非线性最小二乘拟合，图 8 给出测得强度按总光强进行归一化后拟合的结果。图 8(a)为两个通道归一化的测量光强及拟合曲线，图 8(b)为两个通道光强的拟合残差，图 8(c)为两个通道光强拟合残差之和，图 8(d)为 10 组测量的光强变化。图 8(a)~(c)中横坐标均为电机旋转的方位角，单位为度，纵坐标均为归一化光强值，单位为相对于总光强的比值。图 8(d)中横坐标为 10 组测量对应的编号，纵坐标为光强值，单位为  $\mu\text{W}$ 。图 8(b)中，曲线表示 10 次测量在每个旋转位置两

个通道残差各自的均值，误差棒表示 10 组重复测量每个旋转位置残差的标准差。

从图 8(b)中的残差可以看出，拟合残差小于  $0.5\%$ ，对残差进行统计得到标准差为  $0.11\%$ ，是光强随机噪声的 3 倍，拟合残差的趋势与波片方位角相关，存在一定的系统性起伏。从图 8(d)中也可以看到系统透过的总光强随波片方位角变化。根据测量系统的结构，可知拟合残差中的随机部分主要是由光源随机噪声和电机定位的随机误差等因素引起的，拟合残差中系统性起伏很可能是由波片延迟量分布的空间不均匀或电机编码器的固定偏差等造成的。波片延迟量的空间分布不均匀将直接导致光束穿过波片不同区域时的延迟量不同，因而延迟量随方位角的起伏能造成对应拟合残差的系统性起伏。

图 8 中的测量未对光束通过波片上的位置进行准确调节，为了进一步确认该因素的影响，下面调节实验装置使测量光束通过波片的旋转中心。图 9 给出使测量光束通过波片的旋转中心后的测量和拟合结果，图 9 中各坐标和曲线的含义与图 8 一致。

图 9 中的拟合残差明显小于图 8，对图 9(b)中的拟合残差进行统计得到标准差为  $0.07\%$ ，而且图 9(c)中系统透过的总光强随波片方位角变化明显减小，小于  $0.001$ 。对比图 9 和图 8 中的残差可以发现，波片空间不均匀性对拟合残差的影响包括延迟量和透过率的空间分布。当均匀光束通过波片的

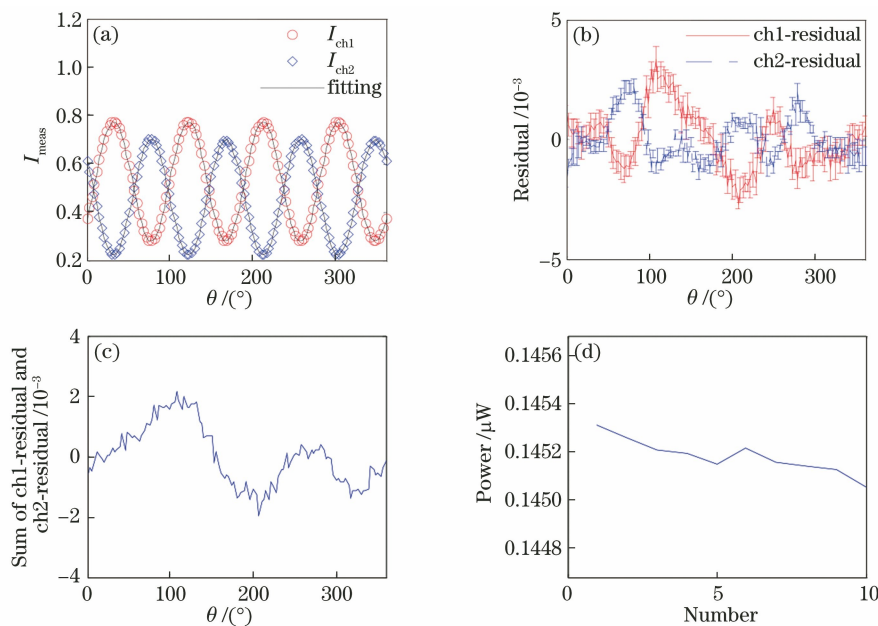


图 8 实测样品的测量结果。(a)光强拟合;(b)两个通道光强的拟合残差;(c)两个通道残差之和;(d)10组测量的光强变化

Fig. 8 Measurement results of quarter wave plate sample. (a) Fitting of intensity; (b) fitting residuals of intensity in two channels; (c) sum of two channel's residual; (d) intensity change of 10 measurements

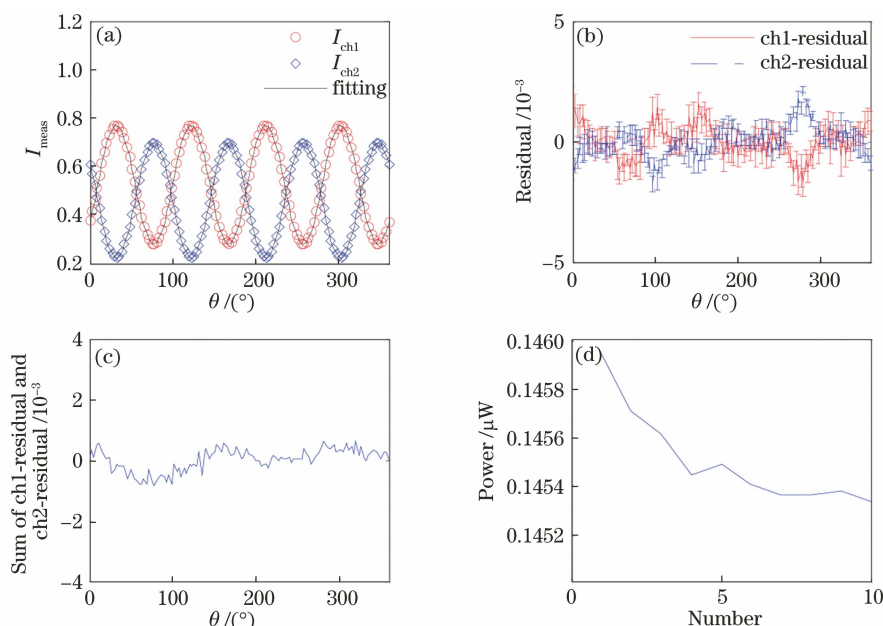


图 9 实测样品测量结果(光束通过旋转中心)。(a)光强拟合;(b)两个通道拟合残差;(c)两个通道残差之和;  
(d) 10 组测量的光强变化

Fig. 9 Measurement results when the beam passes through the rotation center of the sample. (a) Fitting of intensity; (b) fitting residuals of intensity in two channels; (c) sum of two channel's residual; (d) intensity change of 10 measurements

旋转中心时,波片的延迟量和透过率随方位角变化较小,两个通道拟合的残差及残差之和也相应较小。

图 10 给出对图 8 和图 9 中两个通道残差的统计分析,横轴为通道 1 的残差,纵轴是通道 2 的残差,横纵坐标值均为相对于总光强的比值,图 10(a)和图 10(b)分别展示光束未通过波片旋转中心和通过旋转中心的情形。经统计得到两个通道的残差均存在负相关,图 10(a)中相关系数  $R$  为  $-0.52396$ ,图 10(b)中相关系数  $R$  为  $-0.58993$ 。采用二维概率分布函数对图 10(a)和图 10(b)中的分布进行拟合,可得残差沿长轴  $y = -x$  和短轴  $y = x$  方向的标准差,图 10(a)中沿长轴和短轴方向的标准差分别为  $0.001397$  和  $0.000804$ ,图 10(b)中沿长轴和短轴方向的标准差分别为  $0.000921$  和  $0.000468$ 。

根据两个通道测量光强的关系,图 10 中的光强残差沿短轴方向的标准差可以用来表征测量过程中系统总光强的起伏,光强残差沿长轴方向的标准差可以用来表征光强在两个通道上的分配起伏。对比图 10(a)和图 10(b)可知,光束经对准后通过波片的旋转中心时,长轴和短轴方向统计的标准差均明显减小,沿短轴方向的标准差接近光强的随机噪声,该变化的主要原因是对准后波片的延迟量和透过率随方位角变化而减小;但图 10(b)中短轴方向的标准差依然明显大于光强随机噪声,这很可能是由方位

角还有一定起伏或者电机方位角定位存在一定的偏差造成的,具体原因有待进一步确认。

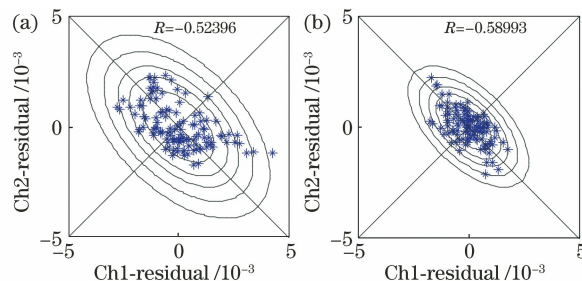


图 10 两个拟合通道残差之间的相关性分析。  
(a)对准前;(b)对准后

Fig. 10 Correlation between residuals in the two measurement channels. (a) Before alignment; (b) after alignment

上面的对比实验说明波片存在空间不均匀性,包括延迟量和透过率的空间不均匀,该不均匀性可能是由于制造误差或者应力等因素造成的。因此,在波片的测量和使用中,应该尽量使光束穿过波片的旋转中心,以排除波片不均匀性的影响。

下面是各参数的拟合结果、置信区间和测量的重复性。表 1 给出拟合得到的系统参数和各参数 95% 的置信区间以及 10 次重复测量得到的均值和标准差,表中各参数为光源光强  $I'_0$ 、探测器响应比  $g$ 、检偏器方位角  $\theta_p$ 、波片延迟量  $\delta$ 、方位角  $\theta_0$  和二

向色角  $\psi$ 。其中,  $90^\circ$  波片对应图 9 中的拟合,  $127^\circ$  波片为实验测量的另一块波片, 其拟合曲线与图 9 相似, 这里只在表 1 中展示对应的测量结果。为了作对比, 还采用 Soleil 补偿法对这两波片的延迟量进行测量, 由于 Soleil 补偿法不能测量元件方位角, 且元件方位角对准误差会对延迟量测量结果造成影响, 因此这里 Soleil 补偿法的测量结果只能作为参

考和比较。图 9 中波片延迟量、方位角和二向色角拟合的置信度很高, 分别为  $\pm 0.027$ 、 $\pm 0.016$ 、 $\pm 0.004$ , 10 次测量拟合结果的标准差很小, 该测量系统的重复性很好。两块波片的二向色角偏离  $45^\circ$  的程度均很小 (小于  $0.005^\circ$ ), 其造成波片 Mueller 矩阵偏离理想波片的程度仅为  $10^{-4}$ , 二向色角偏离  $45^\circ$  的影响可以忽略。

表 1 拟合及 Soleil 补偿法得到的系统参数

Table 1 System parameters obtained by fitting and Soleil compensation method

Sample	Item	$I'_0/\mu\text{W}$	$g$	$\theta_p/(\circ)$	$\delta/(\circ)$	$\theta_0/(\circ)$	$\psi/(\circ)$
	Fitting result	0.1130	0.9705	42.9691	88.9626	83.2275	44.9967
	95% confidence region	$\pm 0.0001$	$\pm 0.0009$	$\pm 0.0280$	$\pm 0.0272$	$\pm 0.0161$	$\pm 0.0041$
$90^\circ$ wave plate	Average of 10 measurements	0.1129	0.9710	42.9461	88.9843	83.2152	44.9952
	Standard deviation of 10 measurements	0	0.0004	0.0126	0.0193	0.0068	0.0035
	Soleil compensator (repeatability: $0.36^\circ$ )	—	—	—	$88.27^\circ$	—	—
	Average of 10 measurements	0.1232	0.9715	42.9174	128.9571	12.5859	45.0037
$127^\circ$ wave plate	Standard deviation of 10 measurements	0	0.0002	0.0105	0.0207	0.0051	0.0014
	Soleil compensator (repeatability: $0.36^\circ$ )	—	—	—	$127.89^\circ$	—	—

## 5 结 论

采用基于双光束检偏的波片测量系统, 实现了对待测波片的延迟量和方位角以及检偏器的方位角拟合, 克服了检偏器方位角误差对波片延迟量和方位角测量的影响, 该系统测量波片的延迟量范围覆盖了太阳望远镜偏振测量中常用的  $1/4$  波片和  $127^\circ$  波片。探测器的非线性响应对基于光强调制的波片测量系统有较大影响, 因此实验前先对探测器非线性响应进行拟合和改正, 克服了探测器非线性响应引入的系统误差。

用该系统对波片样品进行测量时, 应尽量使光束通过波片的旋转中心, 这样可以减小波片旋转过程中延迟量随波片旋转的变化, 克服波片空间分布不均匀对测量造成的影响。拟合所得的待测参数置信度高, 多次测量的重复性好。实验中测量的波片样品的二向色角偏离  $45^\circ$  很小, 该波片的特性可以用延迟量和方位角准确表示。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hou J F, Xu Z, Yuan S, et al. Spectro-polarimetric

observations at the NVST: I. instrumental polarization calibration and primary measurements [EB/OL]. 2019-11-18 [2020-01-13]. <https://arxiv.org/abs/1911.07397>.

- [3] Yuan S. Polarization model for the new vacuum solar telescope [C] // *Proceedings of Solar Polarization 7*, September 9-13, 2013, Kunming, China. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2014, 489: 297-304.
- [4] Yuan S, Hou J F, Wang D G, et al. The polarization model calibration of the New Vacuum Solar Telescope [C] // *Proceedings of Solar Polarization 8*, September 12-16, 2016, Firenze, Italy. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2020.
- [5] Liu W W, Yuan S, Jin Z Y. Polarization modelling of coude optics and vacuum window for the new vacuum solar telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0826001.  
刘维维, 袁沫, 金振宇. 1 m 红外太阳望远镜折轴光路与封窗偏振建模 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0826001.
- [6] Anan T, Huang Y W, Nakatani Y, et al. Developments of a multi-wavelength spectropolarimeter on the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2018, 70(6): 102-114.
- [7] Goode P R, Cao W, Ahn K, et al. The new solar telescope in big bear: polarimetry I [C] // *Proceedings*



- of Solar Polarization 6, May 30-June 4, 2010, Maui, Hawaii, USA. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2011, 437: 341-344.
- [8] Hofmann A, Arlt K, Balthasar H, et al. The GREGOR polarimetric calibration unit [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333(9): 854-862.
- [9] Zhang Z Y, Deng Y Y, Wang D G, et al. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1678-1685.  
张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 几种波片位相延迟测量方法的比较[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1678-1685.
- [10] Ren H L, Wang J Y, Lou L R, et al. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 249-253.  
任洪亮, 王久扬, 楼立人, 等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 249-253.
- [11] Zeng A J, Li F Y, Zhu L L, et al. Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photoelastic modulator [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4347-4352.
- [12] Williams P A, Rose A H, Wang C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6466-6472.
- [13] Hou J F, Wang D G, Deng Y Y, et al. Phase retardation measurement with least square fitting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812001.  
侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812001.
- [14] Hou J F, Yu J, Wang D G, et al. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0408007.  
侯俊峰, 于佳, 王东光, 等. 自校准法测量波片相位延迟[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0408007.
- [15] Yuan K H, Deng J X, Liu C, et al. A fast and simultaneous method for measuring wave plate phase retardation and fast axis azimuth [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021202.  
袁凯华, 邓剑勋, 刘超, 等. 一种快速同时测量波片相位延迟量和快轴方位角的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021202.
- [16] Clarke D. Interference effects in compound and achromatic wave plates [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(11): 1041-1046.
- [17] Ichimoto K, Shinoda K, Yamamoto T, et al. Photopolarimetric measurement system of Mueller matrix with dual rotating waveplates [J]. *Publications of the National Astronomical Observatory of Japan*, 2006, 9(1): 11-19.