

文章编号 1004-924X(2013)08-1915-08

斯托克斯椭偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标

侯俊峰*, 王东光, 邓元勇, 张志勇, 孙英姿

(中国科学院 国家天文台 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012)

摘要: 由于传统的斯托克斯椭偏仪定标方法中入射光源的偏振效应、定标单元中光学元件的制造与装调误差都会降低仪器矩阵的定标精度, 从而影响偏振态的测量精度, 本文提出了基于非线性最小二乘拟合算法的仪器矩阵偏振定标方法。该方法将描述定标单元的参量和仪器矩阵的所有矩阵元一起作为未知参数, 根据偏振光学传输理论建立探测光强与未知参数的函数关系式; 然后, 基于非线性最小二乘拟合方法拟合实际探测光强随定标单元方位角的变化曲线, 进而得到斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵。实验中使用该方法和传统方法在 500~700 nm 波段分别定标了 KD*P 型斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵。结果显示, 新方法在 500~600 nm 波段获得的斯托克斯参数的总均方根(RMS)偏差为 1.6%, 较传统定标方法提高约 0.5%; 波长大于 600 nm 时, 由于系统信噪比降低使得新方法的测量精度降为 2.4%, 但仍然远高于传统方法的测量精度。结果表明, 提出的方法简单易行, 适用于各种斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵定标。

关键词: 太阳望远镜; 斯托克斯椭偏仪; 偏振定标; 非线性最小二乘拟合; 仪器矩阵

中图分类号: TH744.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.1915

Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer

HOU Jun-feng*, WANG Dong-guang, DENG Yuan-yong, ZHANG Zhi-yong, SUN Ying-zi

(Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

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

Abstract: Traditional calibration methods for a Stokes ellipsometer will reduce the calibration accuracy of instrument matrix and effect the measuring accuracy of a polarization state, due to the polarization effect of incident light and the imperfect optical elements in a calibration unit. To measure precisely the instrument matrix of the Stokes ellipsometer, a calibration method was proposed based on the nonlinear least-square fitting method. By taking error sources mentioned above and instrument matrix together as unknown parameters, the function formula between detector intensity and unknown parameters was established based on the Mueller matrix theory. Then nonlinear least-square fitting method was used to fit the detecting intensity curves changed with the azimuth of calibration units and to calculate the instrument matrix of Stokes ellipsometer. The new method and traditional methods were used to calibrate the instrument matrix at 500—700 nm, and it is shown that the total Root Mean Square (RMS) of the Stokes parameter by the proposed method is 1.6% in

收稿日期: 2013-02-21; 修订日期: 2013-03-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11273034, No. 11178005, No. 10778723); 空间科学先导专项资助项目 (No. XDA04060804-02); 中科院知识创新工程重大方向性项目 (No. KJCX2-EW-T07); 国家天文台青年人才基金资助项目 (No. O835032002)

500—600 nm, about 0.5% less than that of traditional methods. Moreover, when wavelength is larger than 600 nm, the RMS drops to 2.4%, but it still is far less than that of traditional methods. In conclusions, the method is easily feasible and is suitable for the calibration of instrument matrix for various Stokes ellipsometers.

Key words: solar telescope; Stokes ellipsometer; polarization calibration; nonlinear least-square fitting; instrument matrix

1 引 言

斯托克斯椭偏仪^[1-4]是一种高速测量光波偏振态的仪器,能够近似实时地测量出描述入射光波偏振态的全部斯托克斯参数。在太阳物理研究领域,人们就是通过斯托克斯椭偏仪测量太阳光斯托克斯偏振分量来实现太阳磁场的测量,然后根据塞曼分裂原理得到太阳磁场与被测偏振态的关系,进而研究黑子、耀斑及日冕物质抛射等与磁场有关的太阳活动现象^[5]的。随着太阳物理研究的日益深入,天文学家对太阳磁场望远镜的偏振测量精度提出了更高的要求,例如美国的先进技术太阳望远镜^[6](ATST)要求其达到 5×10^{-4} ,我国在研的深空太阳望远镜^[7](DSO)和巨型太阳望远镜^[8](CGST)则要求达到 2×10^{-4} 。斯托克斯椭偏仪作为太阳磁场望远镜的核心部件之一,其仪器矩阵的定标精度直接影响望远镜的偏振测量精度。因此,实现仪器矩阵的精确定标是提高太阳磁场望远镜偏振测量精度的必要条件。

传统的仪器矩阵定标方法主要有四点定标法和 E-P 定标法^[9-12]。它们都是将一组包含偏振片和 1/4 波片的偏振发生器(PSG)作为定标单元,产生 4 组或 4 组以上的偏振光直接入射斯托克斯椭偏仪进行仪器矩阵的定标。这些方法根据光源的不同,或者假设入射光为完全非偏振光(如氙灯、溴钨灯),或者假设入射光为完全线偏光(如激光),此时入射光的实际偏振效应将影响仪器矩阵的定标精度。此外,这些方法均假设定标单元中 1/4 波片的方位角和相位延迟是理想的。而在实际应用中,元件方位角和相位延迟的误差会降低

仪器矩阵的精确定标。

鉴于传统定标方法的不足,本文提出了一种基于非线性最小二乘数据拟合算法进行偏振定标的新方法。该方法将入射光的斯托克斯参数^[13]和定标单元中波片的方位角和相位延迟与仪器矩阵的所有矩阵元一起作为未知参数,根据偏振光学传输理论建立了探测光强与未知参数之间的函数关系式,设计非线性拟合方法拟合实际探测光强随定标装置方位角的变化曲线,进而得到斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵。该方法将传统方法的误差源作为未知参数随仪器矩阵一起由非线性最小二乘拟合求解,有效避免了这些误差源引起的定标误差。

2 仪器矩阵的非线性最小二乘拟合定标原理

图 1 为斯托克斯椭偏仪仪器矩阵的定标光路示意图。光源发出的光束经过定标单元(起偏器和 1/4 波片组合)后,由斯托克斯椭偏仪探测得到 4 个光强,记为 $\mathbf{I}_{\text{out}} = [I_0, I_1, I_2, I_3]^T$ 。设定入射光的归一化斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_{\text{in}} = [1, S_1, S_2, S_3]^T$,根据偏振光传输理论,探测光强 \mathbf{I}_{out} 与入射光的斯托克斯参数 \mathbf{S}_{in} 有如下关系:

$$\mathbf{I}_{\text{out}} = \tau \mathbf{X} \mathbf{M}_{\text{WP}} \mathbf{M}_{\text{P}} \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (1)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{01} & x_{02} & x_{03} \\ x_{10} & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{20} & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{30} & x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{\text{WP}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_2 + \cos \delta \sin^2 2\theta_2 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_2 & -\sin \delta \sin 2\theta_2 \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_2 & \sin^2 2\theta_2 + \cos \delta \cos^2 2\theta_2 & \sin \delta \cos 2\theta_2 \\ 0 & \sin \delta \sin 2\theta_2 & -\sin \delta \cos 2\theta_2 & \cos \delta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 & 0 \\ \cos 2\theta_1 & \cos^2 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_1 & 0 \\ \sin 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_1 & \sin^2 2\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中: τ 为系统透射率, \mathbf{X} 为被测斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵, \mathbf{M}_{WP} 和 \mathbf{M}_P 分别为定标单元中波片和起偏器的 Mueller 矩阵, θ_1 和 θ_2 分别是偏振片和波片的方位角, δ 为波片的相位延迟。

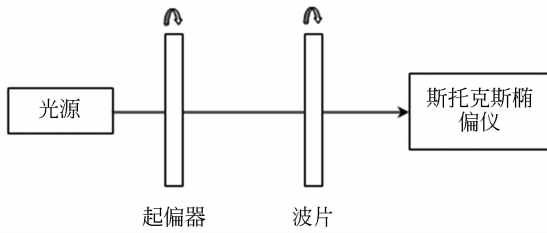


图 1 斯托克斯椭偏仪仪器矩阵定标光路示意图
Fig. 1 Block diagram of calibration system of Stokes ellipsometer's instrument matrix

非线性最小二乘拟合方法中被拟合参数的选择如下:

(1) 选用消光比大于 10 000 : 1 的起偏器, 可以认为起偏器是完美的, 此时入射光的圆偏振分量不影响实际定标。因此, 仅选择入射光的斯托克斯参数中两个线偏光分量 S_1 和 S_2 作为未知参数即可;

(2) 校准过程中, 波片快轴相对于起偏器透射光轴存在的误差为 θ_0 。此外, 由于制造误差, 定标单元的波片可能并非精确的 1/4 波片。假设波片的相位延迟为 δ , 非线性最小二乘拟合定标中将 θ_0 和 δ 作为未知参数;

(3) 系统透射率 τ 和仪器矩阵 \mathbf{X} 的 15 个矩阵元作为未知参数。

最终, 公式(1)写为:

$$\mathbf{I}_{out} = F(\tau, S_1, S_2, \theta_0, \delta, x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{30}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, \theta_1, \theta_2). \quad (2)$$

定标单元中, 起偏器和波片分别以步长 $\Delta\theta = 45^\circ$ 独立旋转, 获得 64 组调制偏振态, 斯托克斯椭偏仪探测得到 64 组光强, 记为 $\tilde{\mathbf{I}}_{out}(m\Delta\theta, n\Delta\theta)$, $\theta_1 = m\Delta\theta$, $\theta_2 = n\Delta\theta$ ($m, n = 1, 2, \dots, 8$)。利用非线性最小二乘拟合方法求解公式(2)中的所有未知参数, 拟合函数如式(3)所示, 其中 i 代表每一组光强的个数。由 matlab 库函数 lsqcurvefit 拟合得

到所有未知参数, 从而获得斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵 \mathbf{X} 。

$$\chi^2 = \min \left\{ \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 \sum_{i=1}^4 (\tilde{\mathbf{I}}_{out}(m\Delta\theta, n\Delta\theta) - \mathbf{I}_{out}(m\Delta\theta, n\Delta\theta))^2 \right\}. \quad (3)$$

非线性最小二乘拟合方法的困难在于拟合初值的选择。如参数较多, 全局优化时不同的拟合初值可能会有不同的拟合结果。尽管还有诸如蒙特卡洛法、遗传算法、RBF 神经网络、支持向量机等算法, 可以用来寻找全局最小值, 但这些算法不是非常复杂, 就是非常费时, 效果并不如意。因此, 寻找一组合适的初值使得本文所用的非线性最小二乘拟合偏振定标方法的拟合结果接近于真实状态, 对于斯托克斯椭偏仪的偏振定标有重要价值。

一般情况下, 理想的斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵 \mathbf{X} 的每一行代表斯托克斯椭偏仪的一个偏振状态, 该偏振态可以由归一化的 Stokes 矢量描述, 即:

$$[x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14}] = [1 \ \cos 2\beta \cos 2\varphi \ \cos 2\beta \sin 2\varphi \ \sin 2\beta], \quad (4)$$

其中: $\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]$, $\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 代表偏振空间所有可能的偏振态。本实验中所选的拟合初值如公式(5)所示。然后利用随机模拟的方法, 随机模拟给出可能的斯托克斯椭偏仪拟合参数的真值, 利用式(5)的拟合初值做非线性最小二乘拟合, 求解得到的拟合参数与模拟真值之差定义为参数拟合误差。通过 1 000 次模拟, 分析参数拟合误差的大小以判断所选的拟合初值是否满足要求。公式(6)为模拟真实值的选择范围, 几乎涵盖了各种可能的偏振定标系统状态。

图 2 为随机模拟结果, 1 000 次模拟中仪器矩阵的拟合误差在 1×10^{-3} , 由此可见本文使用的非线性最小二乘拟合方法及初值的选择是有效的。

$$[\tau, S_1, S_2, \theta_0, \delta, x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{30}, x_{31}, x_{32}, x_{33}]_0 = [1, 0, 0, 0, \pi/2, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5], \quad (5)$$

$$\tau \in [0.1, 1]; S_1, S_2 \in [-0.1, 0.1];$$

$$\theta_0 \in [-10^\circ, 10^\circ]; \delta \in [40^\circ, 140^\circ];$$

$$\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]; \varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]. \quad (6)$$

该方法将传统方法的误差源(入射光的斯托

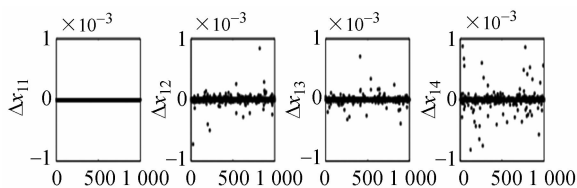


图 2 非线性拟合方法的误差估计

Fig. 2 Error evaluation of nonlinear fitting method

克斯参数、波片的方位角误差和相位延迟)作为未知参数随仪器矩阵一起由非线性拟合求解,避免了这些误差源引起的测量误差。

3 测量实验与结果

3.1 实验装置

根据上述原理建立的实验装置示意图及实物图分别如图 3、图 4 所示。将配有高精度稳压电源的溴钨灯作为入射光源,出射光束经过光纤耦合器转化为准直度小于 0.3° 、光斑小于 5 mm 的准直光束,并通过定标单元被斯托克斯椭圆偏仪调制和接收。定标单元中起偏器的消光比大于 10 000 : 1,波片 1 在中心波长 532.4 nm 处为近 $1/4$ 波片,由步进电机控制两元件旋转,转动精度优于 $2'$,由计算机控制 360° 自由旋转。

实验中,被测量的斯托克斯椭圆偏仪由两个 $KD * P$ 电光晶体 $KD * P_1$ 和 $KD * P_2$ 、波片 2、检偏器和光纤光谱仪组成。高压调制器以倍频的关系控制两 $KD * P$ 两端电压的快速反转,从而实现入射光斯托克斯参数的完全调制。光纤光谱仪主要包含微型光栅和线阵 CCD,可以同时得到多个波长处的光强值,可测光谱为 300~1 100 nm。整个测量系统由 Labview 软件编程实现自动化控制。

3.2 测量结果

一般情况下,入射光的斯托克斯参数、波片的方位角误差和相位延迟随波长变化。由于这些参数的不确定性,单一波长处的仪器矩阵定标可能无法比较和分析非线性最小二乘拟合方法和传统方法的差异。为了克服这一困难,实验中利用斯托克斯椭圆偏仪中光纤光谱仪的优势同时定标 500~700 nm 波段的仪器矩阵。实验中分别使用非线性最小二乘拟合定标方法、四点定标法和 E-P 定标法测量了 $KD * P$ 型椭圆偏仪的仪器矩阵 X ,测

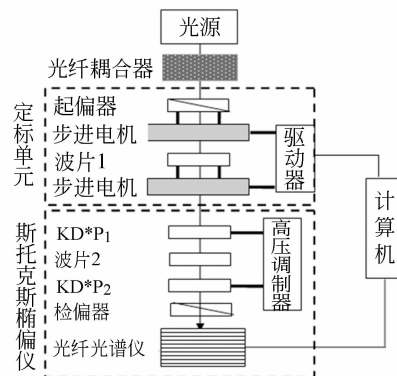


图 3 斯托克斯椭圆偏仪仪器矩阵测量装置示意图

Fig. 3 Scheme for measurement system of Stokes ellipsometer's instrument matrix

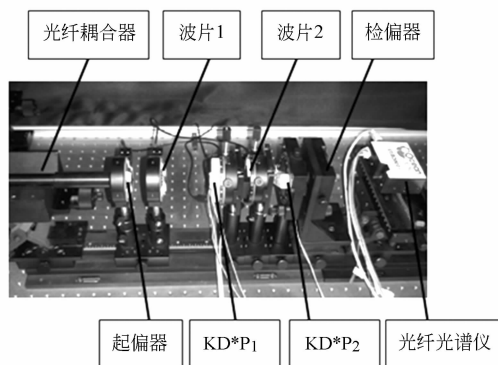


图 4 斯托克斯椭圆偏仪仪器矩阵测量装置实物图

Fig. 4 Measurement system of Stokes ellipsometer's instrument matrix

量结果如图 5 所示。

通过分析发现,在波长为 500~600 nm 时,对于仪器矩阵的第 4 列,3 种定标方法的结果相一致,这表明定标单元中波片 1 的相位延迟的小角度误差对四点定标法和 E-P 定标法的测量精度影响甚微;而对于仪器矩阵的前三列,四点定标法和 E-P 定标法的结果相一致,但与非线性最小二乘拟合法有偏离。其主要原因是两种传统方法中假设入射光是完全非偏振的,且认为定标单元中波片 1 的方位角不存在误差。由非线性最小二乘拟合法的参数拟合结果可知,入射光并非完全非偏振光且波片 1 的方位角存在误差;当波长大于 600 nm 后,四点定标法和 E-P 定标法的结果基本保持一致,但与非线性最小二乘拟合法偏离较大,这是由于波片 1 的相位延迟随着波长变大而愈加偏离 90° (见图 7),四点定标法和 E-P 定标法中波片 1 为准 $1/4$ 波片的假设不再成立,从而引起两种方法的测量误差。

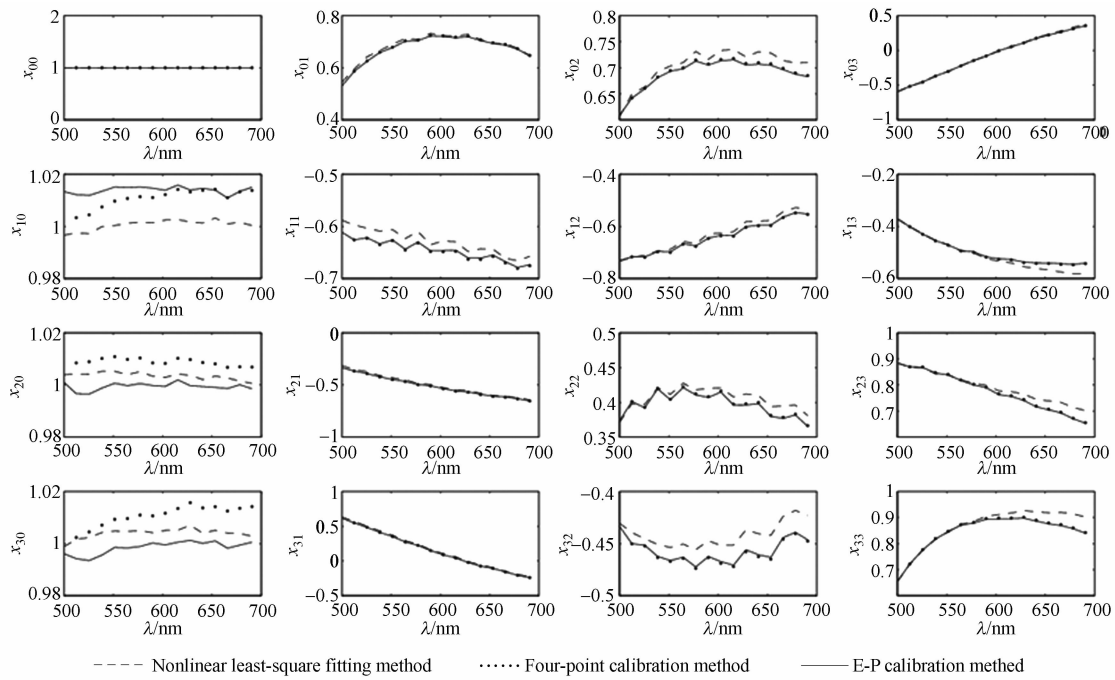


图 5 斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵 \mathbf{X} 定标结果

Fig. 5 Calibration results of Stokes ellipsometer's instrument matrix \mathbf{X}

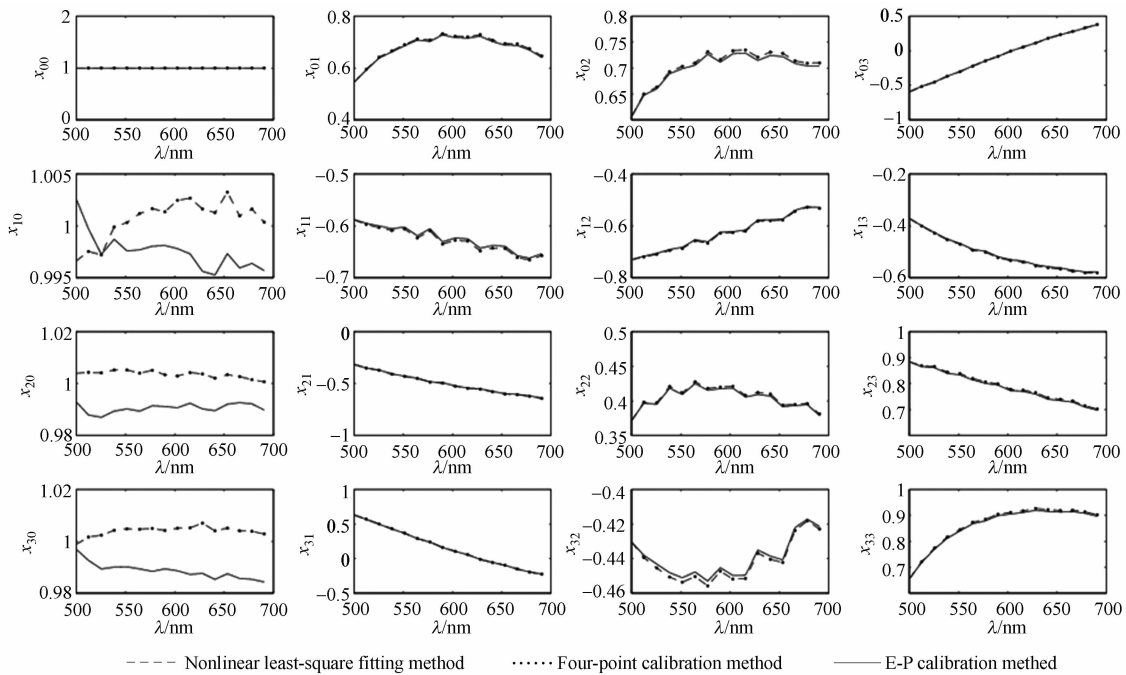


图 6 修正后斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵 \mathbf{X} 定标结果

Fig. 6 Calibration results of Stokes ellipsometer's instrument matrix \mathbf{X} after correction

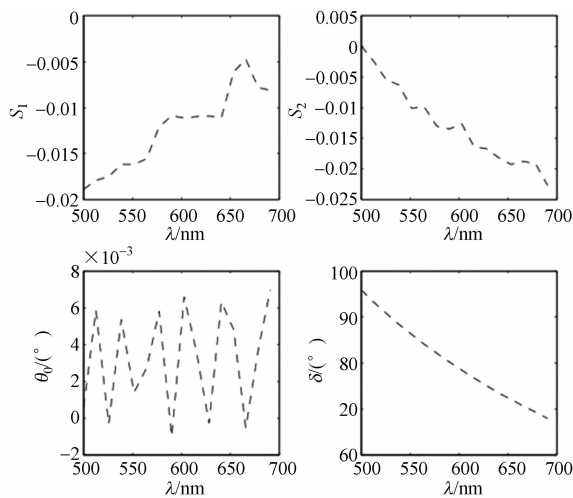


图 7 波片 1 的相位延迟与波长的关系曲线

Fig. 7 Relations between retardation of waveplate 1 and wavelength

将非线性最小二乘法拟合得到的入射光的 Stokes 参数 S_1, S_2 , 波片 1 的初始方位角误差 θ_0 和相位延迟 δ 作为已知量修正四点定标法和 E-P 定标法。修正后测得的仪器矩阵如图 6 所示, 3 种方法的结果基本保持一致。由此表明, 非线性最小二乘法拟合方法在偏振定标过程中有效地提高了测量精度, 避免了入射光源的偏振效应、定标单元中光学元件初始方位角和相位延迟误差对测量精度的影响。

采用反演的方式^[11]来估计仪器矩阵的准确性, 即通过测量各角度下的光强值, 结合仪器矩阵反演出对应角度的斯托克斯分量, 将其与理论值进行对比分析。测量方法为: 将校准单元中起偏器的方位角固定为 0° , 以 10° 为步长, 从 0° 到 360° 旋转波片, 由此产生 37 个不同的偏振态, 同时用斯托克斯椭圆仪对上述的偏振态进行测量得到 \mathbf{I} ; 然后用定标得到的仪器矩阵 \mathbf{X} (见图 5) 和 \mathbf{I} 带入式 $\mathbf{S} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{I}$, 求得波片对应角度下 4 个斯托克斯分量的实验值。定义斯托克斯参数测量值与理论值之间的平均偏差为:

$$\Delta S_i = \frac{1}{37} \sum_{j=1}^{37} |S_{ij} - S_{ij}'|, (i = 0, 1, 2, 3), \quad (7)$$

式中: S_{ij} 为斯托克斯参数的测量值, S_{ij}' 为理论值。

定义斯托克斯参数的总均方根 (RMS) 偏差为:

$$\Delta S = \sqrt{\Delta S_1^2 + \Delta S_2^2 + \Delta S_3^2}. \quad (8)$$

图 8 为中心波长为 532.4 nm 处 3 种方法斯托克斯参量实验值与理论值的对比。 ΔS 的测量结果如图 9 所示。由图可知, 当波长为 500~600 nm 时, 非线性最小二乘法拟合方法获得的斯托克斯参数的总均方根 (RMS) 偏差约为 1.6%, 较传统定标方法 (四点定标法和 E-P 定标法的 RMS 约为 2.1%) 提高约 0.5%; 波长大于 600 nm 时, 系统信噪比的降低使得新方法的测量精度降为 2.4%, 但由于波片 1 的相位延迟远远偏离 90° (见图 7), 这使传统测量的误差显著增大, 远大于非线性最小二乘法拟合方法的测量误差。

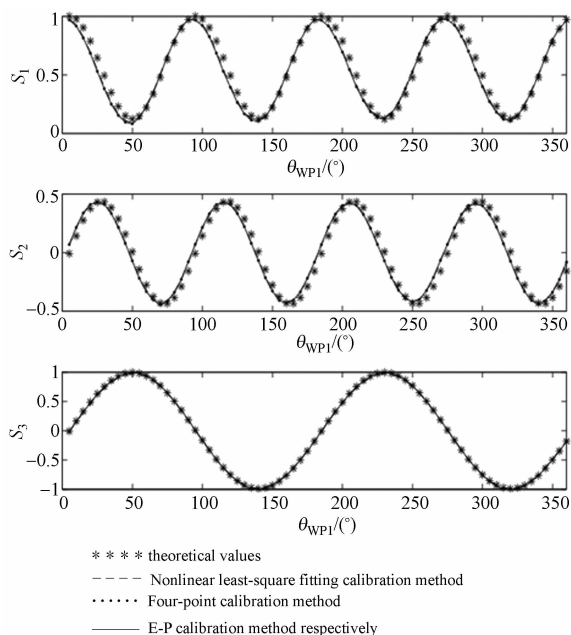


图 8 波长为 532.4 nm 处 3 种方法斯托克斯参量实验值与理论值的对比

Fig. 8 Comparison between theoretical and experimental values of Stokes parameters by three methods

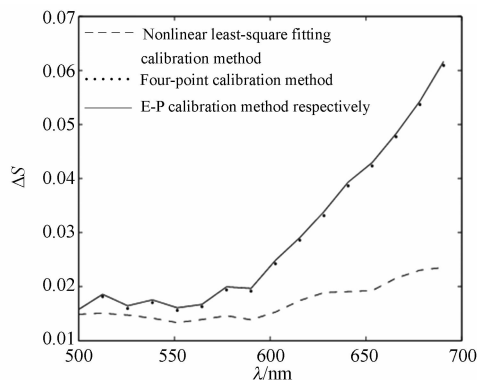


图 9 斯托克斯参量的总均方根偏差

Fig. 9 Total RMS of Stokes parameters

4 结 论

本文提出了仪器矩阵的非线性最小二乘拟合偏振定标方法,理论上设计了该方法的定标原理,建立了对应的定标系统,对KD*P型斯托克斯椭偏仪进行了定标,并与传统的四点定标和E-P定标的结果进行了对比和分析。实验结果表明:在波长500~600 nm处,新方法获得的斯托克斯

参数的总均方根(RMS)偏差为1.6%,较传统定标方法提高约0.5%;在波长大于600 nm时,非线性最小乘法的测量精度降为2.4%,但仍然远高于传统方法的测量精度。

非线性最小二乘拟合定标方法弥补了传统方法中入射光的偏振效应及波片的快轴方位角和相位延迟误差引起的测量误差,提高了测量精度。该方法测量简单便捷,适用于各种斯托克斯椭偏仪的仪器矩阵定标。

参考文献:

- [1] AZZAM R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter(DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light [J]. *Opt. Acta*, 1982, 29(5):685-689.
- [2] WANG D G, AI G X, SUN C H, *et al.*. Optical design of polarimeter for space solar telescope [J]. *SPIE*, 2000, 4013:616-624.
- [3] WANG D G, DENG Y Y, AI G X. Analysis of a new polarimeter for space solar telescope [J]. *SPIE*, 2002, 4843:406-413.
- [4] 张志勇,邓元勇,王东光,等. 基于液晶波片的近红外偏振分析器[J]. *中国激光*, 2010, 37(3):696-702. ZHANG ZH Y, DENG Y Y, WANG D G, *et al.*. Near infrared polarimeter based on liquid crystal variable retardes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3):696-702. (in Chinese)
- [5] 林元章. 太阳物理导论[M]. 北京:科学出版社, 2000. LIN Y ZH. *Introduction to Solar Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [6] KEIL S, RIMMELE T, KELLER C, *et al.*. Design and development of the advanced technology solar telescope [J]. *Astron. Nachr.*, 2003, 324: 303-307.
- [7] DENG Y Y, ZHANG H Q. Progress in space solar telescope [J]. *Sci. China Ser. G*, 2009, 52(11): 1655-1659.
- [8] LIU ZH, DENG Y Y, JI H SH, *et al.*. Ground-based giant solar telescope of China [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2012, 42(12): 1282-1291.
- [9] AZZAM R M A, LOPEZ A G. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1989, 6(10):1513-1521.
- [10] KRISHNAN S. Calibration, properties, and application of the division-of-amplitude photopolarimeter at 632.8 nm and 1 523 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, 9(9):1615-1622.
- [11] 王勇辉,郑春龙,赵振堂. 基于斯托克斯椭偏测量系统的多点定标法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108013. WANG Y H, ZHENG CH L, ZHAO ZH T. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11):1108013. (in Chinese)
- [12] 宋茂新,孙斌,孙晓兵,等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1153-1158. SONG M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1153-1158. (in Chinese)
- [13] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003. LIAO Y B. *Polarization of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



侯俊峰(1986—),男,山西晋城人,博士研究生,2008年于山西大学获得学士学位,主要从事偏振光学方面的研究。E-mail: jfhou@bao. ac. cn



张志勇(1972—),男,辽宁锦州人,博士,高级工程师,主要从事天文光学仪器的研究。E-mail: polarimetry@163. com



孙英姿(1979—),女,辽宁人,博士,高级工程师,主要从事天文光学仪器的研究。E-mail: syz@bao. ac. cn

导师简介:



王东光(1966—),女,北京人,博士,研究员,主要从事太阳磁场测量仪器与偏振元件的研究。E-mail: wdg@bao. ac. cn



邓元勇(1965—),男,四川资阳人,博士,研究员,博士生导师,主要从事太阳物理和天文仪器的研究。E-mail: dyy@bao. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)