

单波长中红外穆勒矩阵椭偏仪的设计、定标与测试

郑州^{1,2}, 侯俊峰^{1,2*}¹中国科学院国家天文台, 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 随着科学家对探测精度的要求不断提高,探测设备的偏振精度愈显重要。如何精确测量元件及系统的偏振特性以优化并提高设备的偏振测量精度是一个关键问题。设计并建立了一套中红外穆勒矩阵椭偏仪,在 12.32 μm 波长下,使用非线性拟合法和双旋转法对系统进行了定标和测试比对。结果表明,该椭偏仪的穆勒矩阵测量精度优于 0.02;透、反射样品的重复测量精度分别为 0.01 和 0.02。该研究可为中红外穆勒矩阵椭偏仪的设计和应用提供借鉴。

关键词 测量; 椭偏测量; 中红外; 穆勒矩阵; 偏振测量

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1812004

Design, Calibration, and Measurement of Single Wavelength Mid-Infrared Mueller Matrix Ellipsometer

Zheng Zhou^{1,2}, Hou Junfeng^{1,2*}¹National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;²School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As scientists' requirements for the polarization accuracy continue to increase, the polarization accuracy of detection equipment becomes more and more important. Therefore, how to accurately measure the polarization characteristics of components and systems in order to optimize and improve the polarization measurement accuracy of the equipment is a key issue. In this paper, a mid-infrared Mueller matrix ellipsometer is designed and established, and the system is calibrated and tested by using the non-linear fitting method and the dual-rotating method at 12.32 μm wavelength. The results show that the measurement accuracy of the Mueller matrix of the ellipsometer is better than 0.02; the repeated measurement accuracy of the transmission sample and the reflection sample is 0.01 and 0.02, respectively. This study can provide reference for the design and application of mid-infrared Muller matrix ellipsometers.

Key words measurement; ellipsometry; mid-infrared; Mueller matrix; polarimetry

1 引言

偏振探测可以利用物体的偏振特性提供包含物体表面粗糙度、密度、磁场等的有效信息,因此逐渐被广泛应用于天文、生物、军事等诸多领域^[1-6]。然而,随着科学家们对中红外设备探测精度的要求不断提高,设备自身的偏振精度显得愈加重要^[7]。在太阳物理研究当中,我国正在研制 1 m 离轴中红外太阳磁场望远镜(AIMS),其工作波长为 Mg I 12.32 μm ,要求望远镜的偏振灵敏度在 10^{-3} 以上,相应的斯托克斯矢量分量 Q 、 U 、 V 之间的偏振串扰优于 0.01^[8]。此时,望远镜中

各种反射镜或组件产生的仪器偏振限制了望远镜的偏振灵敏度和精度。因此,如何更精确地测量这些反射、透射元件乃至组件的偏振特性,以期通过偏振建模和优化提高偏振精度和灵敏度是中红外偏振设备实现精确偏振测量面临的一个普适性问题。

目前的偏振检测设备主要分两种。一种是由起偏器、补偿器和检偏器组成的传统椭偏仪,通过测量样品的 Jones 矩阵来获取被测样品的偏振信息^[9],但是此类椭偏仪要求该样品是完全偏振的,无法准确测量不完全偏振的样品和多个偏振特征叠加的样品^[10]。另一种是由偏振发生器(PSG)和偏振分析器(PSA)组成的穆

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(11773040, 11427901, 11403047, 11427803)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15010800, XDA15320102)、中国科学院仪器设备功能开发项目(116400CX03)

通信作者: *jhou@bao.ac.cn

勒矩阵椭偏仪,通过 16 次独立测量得到穆勒矩阵的全部 16 个矩阵元^[11-12],能够对不完全偏振的样品和多偏振系统组成的样品进行测量,得到它们的偏振特性^[13],因此更适合用于偏振系统或组件的检测。尽管如此,目前国际上穆勒矩阵椭偏仪的研究和应用主要集中在可见光和近红外波段,针对中红外波段的椭偏研究和应用较少,而国内红外椭偏仪研究起步较晚,虽然仪器性能接近国际一流水平,但是在中红外波段的研究进展相对缓慢^[14]。

基于此,本文设计并建立了一套中红外穆勒矩阵椭偏仪,通过非线性拟合和双旋转两种测量方法对比分析了该椭偏仪的定标和测量精度。该研究可为高精

度中红外穆勒矩阵椭偏仪的设计和应用提供借鉴。

2 测量原理

由于中红外延迟器件主要为双折射晶体,因此采用旋转型穆勒矩阵椭偏仪设计方案,其基本测量原理如图 1 所示,偏振光学系统主要由光源、起偏器 P、补偿器 C₁、待测样品、补偿器 C₂、检偏器 A 和探测器组成,P 和 C₁ 合称为偏振发生器,C₂ 和 A 合称为偏振分析器。其中:P、C₁、C₂ 和 A 由旋转电机驱动,可 360° 自由旋转;P 和 A 的消光比优于 10000:1,可作为理想偏振片;C₁ 和 C₂ 为 λ/4 波片,在工作波段镀增透膜以忽略二向色性的影响。最终系统主要的偏振参数如图 1 所示。

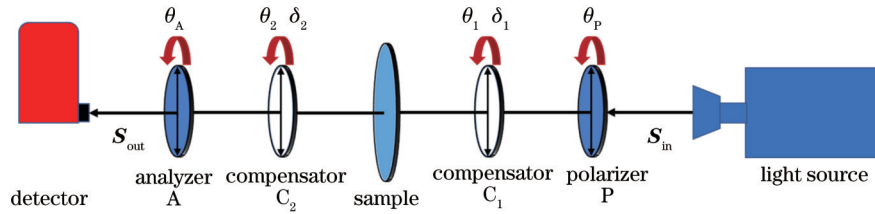


图 1 穆勒矩阵椭偏仪测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Mueller matrix ellipsometer

根据偏振光学理论^[8],探测光强与入射光之间有如下关系:

$$I_{\text{meas}} = \tau [1 \ 0 \ 0 \ 0] S_{\text{out}} = \tau [1 \ 0 \ 0 \ 0] R(-\theta_A) M_A R(\theta_A - \theta_2) \times M_{C_2}(\delta_2) R(\theta_2) M_S R(-\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中: θ_P 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_A 分别为起偏器 P、补偿器 C₁、补偿器 C₂ 和检偏器 A 的方位角; δ_1 、 δ_2 为补偿器 C₁ 和 C₂ 的相位延迟; S_{out} 为出射光的斯托克斯矢量; $S_{\text{in}} = [I \ Q \ U \ V]^T$ 为入射光的斯托克斯矢量; τ 为系统透过率; I_{meas} 为探测强度; M_P 、 M_{C_1} 、 M_{C_2} 、 M_A 分别为起偏器 P、补偿器 C₁、补偿器 C₂ 和检偏器 A 的本征穆勒矩阵, $R(\theta)$ 为旋转矩阵,可分别表示为

$$M_A = M_P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_{C_i}(\delta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ 0 & 0 & -\sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \quad (i=1,2), \quad (3)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

通过偏振发生器和偏振分析器的不同组合可以实现中红外穆勒矩阵椭偏仪的定标和样品穆勒矩阵的测量。由于中红外波段信号弱,且肉眼完全不可见,所以中红外穆勒矩阵椭偏仪定标比可见光穆勒矩阵椭偏仪定标更加困难。为了验证仪器测量精度,本系统同时采用非线性拟合测量法和双旋转测量法两种方法,分

别对椭偏仪进行定标分析及样品测试,以验证椭偏仪系统的可靠性。

2.1 非线性拟合穆勒矩阵测量法

2013 年侯俊峰等^[10]提出了非线性拟合穆勒矩阵测量法,该方法中所有元器件的相位延迟与方位角等参数均由非线性拟合法直接求解,实现了自校准测量。然而,该方法当时主要针对可见光测量,偏振发生器旋转次数多、时间长,且偏振分析器为电光晶体。本系统进一步优化了偏振发生器的调制组合,提高了测量效率;偏振分析器采用旋转波片法进行调制和解调,不仅克服了中红外的元器件限制,而且降低了偏振串扰。本系统测量原理如图 2 所示。

以检偏器 A 为基准,A 的透光方向沿水平方向且固定不动。偏振发生器的起偏器 P 与补偿器 C₁ 共有 6 个调制状态,方位角(θ_P , θ_1)分别为(0°,0°)、(45°,45°)、(90°,90°)、(135°,90°)、(135°,135°)和(135°,180°)。在偏振发生器的每个调制状态下,偏振分析器中的补偿器 C₂ 以 22.5° 为步长旋转一周,探测器共采集 16 个光强数据^[15]。通过一次完整测量共得到 96 个光强数据。重新整理式(1)可得

$$I_{\text{meas}} = M_{\text{Mod}} M_S R(-\theta_1 - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 + \Delta\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}}, \quad (5)$$

式中: M_{Mod} 为偏振分析器的调制矩阵(16 × 4); $\Delta\theta_1$ 为补偿器 C₁ 的初始方位角误差。1997 年,Skumanich 等^[16]针对旋转波片的偏振分析器提出了一种基于傅里

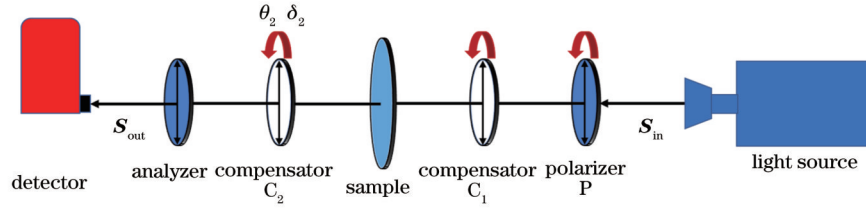


图 2 非线性拟合穆勒矩阵测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Mueller matrix measurement based on nonlinear fitting

叶分析的解调方式,通过该解调可显著降低偏振分析器的偏振串扰。

在式(5)的两端同时乘以一个 4×16 的解调矩阵 M_D :

$$M_D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

可得到

$$I^D = M_D * I_{\text{meas}} = M_D * M_{\text{Mod}} M_S R(-\theta_1 - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 + \Delta\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}} = X M_S R(-\theta_1 - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 + \Delta\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}}, \quad (7)$$

式中: $X = M_D * M_{\text{Mod}}$ 为偏振响应矩阵,代表了偏振分析器对斯托克斯参数的响应。

令 $B = X M_S$, 则式(7)可进一步改写为

$$I^D = BR(-\theta_1 - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 + \Delta\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}}. \quad (8)$$

由式(8)可知,在整个测量系统中:入射光的 Stokes 参量 $[I \ Q \ U \ V]^T$ 、补偿器 C_1 的初始方位角误差 $\Delta\theta_1$ 、相位延迟 δ 、系统透射率 τ 及 B 均为未知参量,此时,光强函数 I^D 是所有未知参数的非线性函数,可表示为

$$I^D = BR(-\theta_1 - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1 + \Delta\theta_1 - \theta_P) M_P R(\theta_P) S_{\text{in}} = f(Q, U, V, \Delta\theta_1, \delta_1, \tau, B), \quad (9)$$

使用非线性拟合对式(9)进行求解,拟合函数可表示为

$$\chi^2 = \min \left[\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{16} (I_{ij}^D - \bar{I}_{ij}^D)^2 \right], \quad (10)$$

式中: $\min(\cdot)$ 表示取最小值; I_{ij}^D 、 \bar{I}_{ij}^D 分别为第 ij 个探测的理论光强值与实测光强值,由式(9)、(10)可以得到 B 。

具体过程如下:

1) 放入样品前,根据上述角度旋转各器件,在 2π 周期内采集 96 组光强,拟合得到偏振分析矩阵 $B = X$;

2) 放入待测样品,再次进行测量,拟合得到偏振分析矩阵 $B' = X M_S$;

3) 由 $B' = X M_S = B M_S$ 求得待测样品的穆勒矩阵为 $M_S = B^{-1} B'$ 。

整个测量过程中,系统需要精密定标的参数均作为未知数处理,利用非线性拟合法求解这些参数,从而得到待测样品的穆勒矩阵,实现了自校准测量。此外,偏振响应矩阵 X 完全表述了偏振分析器的状态,由 X 可以求出 C_2 的相位延迟 δ_2 和初始方位角误差 $\Delta\theta_2$ [见 4.1 节式(13)]。

2.2 双旋转补偿器穆勒矩阵测量法

双旋转补偿器穆勒矩阵测量原理如图 3 所示,采用该测量方法时,使用连续调制会影响探测器中红外弱信号的采集,故使用步进旋转的方法。起偏器 P 和检偏器 A 保持水平透光方向,两个补偿器 C_1 、 C_2 步进旋转,旋转角度之比为 $5:3$ [17]。此时,式(1)可改写为

$$I_{\text{meas}} = \tau [1 \ 1 \ 0 \ 0] R(-\theta_2) M_{C_2}(\delta_2) R(\theta_2) M_S R(-\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(\theta_1) [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T = \tau [1 \ 1 \ 0 \ 0] R(-3\theta - \Delta\theta_2) M_{C_2}(\delta_2) R(3\theta + \Delta\theta_2) M_S R(-5\theta - \Delta\theta_1) M_{C_1}(\delta_1) R(5\theta + \Delta\theta_1) [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T, \quad (11)$$

式中: $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 分别为补偿器 C_1 、 C_2 的初始方位角误差。将 θ 以 3.6° 的步长旋转一周,得到 100 个探测光强,归一化后的探测光强 I_{meas} 仅为 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 δ_1 、 δ_2 以及待测样品穆勒矩阵 M_S 的函数。具体测量方法为:

1) 放入待测样品前, M_S 为单位矩阵,通过空矩阵

定标可获得未知参数 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 δ_1 、 δ_2 的定标值;

2) 放入待测样品,同时将定标得到的 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 δ_1 、 δ_2 代入式(11),然后通过线性最小二乘拟合得到待测样品的穆勒矩阵 M_S 。

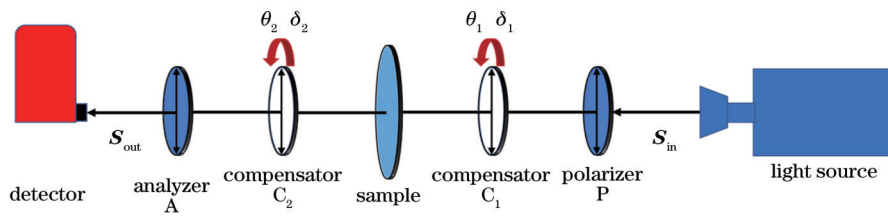


图 3 双旋转穆勒矩阵测量法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of double rotating Mueller matrix measurement

3 系统设计

图 4 是基于基本测量原理(图 1)的中红外穆勒矩阵椭圆偏设计图,由光源、斩波器、光谱仪、偏振发生器、样品台、偏振分析器、探测器、锁相放大器及相关运动控制系统

组成。将从光源发出的光首先经过斩波器,以减小环境噪声对中红外波段测量的影响、提高系统信噪比;光束通过光谱仪后选择特定波长出射,然后依次经过偏振发生器、被测样品和偏振分析器后被探测器接收,探测信号经锁相放大器的信号滤波和放大后,最终由计算机接收。

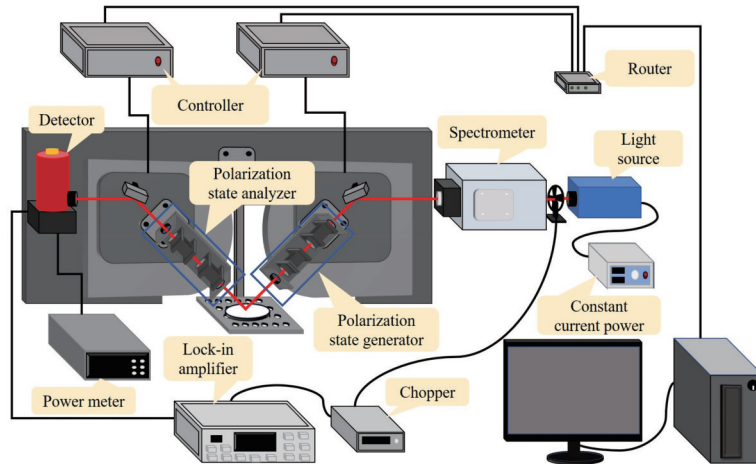


图 4 中红外穆勒矩阵椭圆偏仪设计图

Fig. 4 Design of mid-infrared Mueller matrix ellipsometer

中红外穆勒矩阵椭圆偏仪中:光源选用卓立汉光公司的氮化硅红外光源,光谱覆盖范围为 1~14 μm ;斩波器为 SRS 公司生产的 SR540 型斩波器;锁相放大器为 SRS 公司生产的 SR830 型锁相放大器;光谱仪为 HORIBA 公司生产的 iHR320 型光谱仪,出射波长为 12.32 μm ;起偏器和检偏器选用线栅型偏振片;相位延迟器选用硒化镉(CdSe)晶体 $\lambda/4$ 波片,4 个偏

振元件分别由 4 个电机控制,可独立自由 360° 旋转,电机旋转误差小于 0.03°;探测器采用碲镉汞点源探测器。通过电机控制器可自动控制偏振发生器、样品台、偏振分析器进行旋转和平移,从而实现透射、反射样品的测量,受仪器空间的限制,反射样品的入射角度范围为 45°~70°。整个装置实物图如图 5 所示。

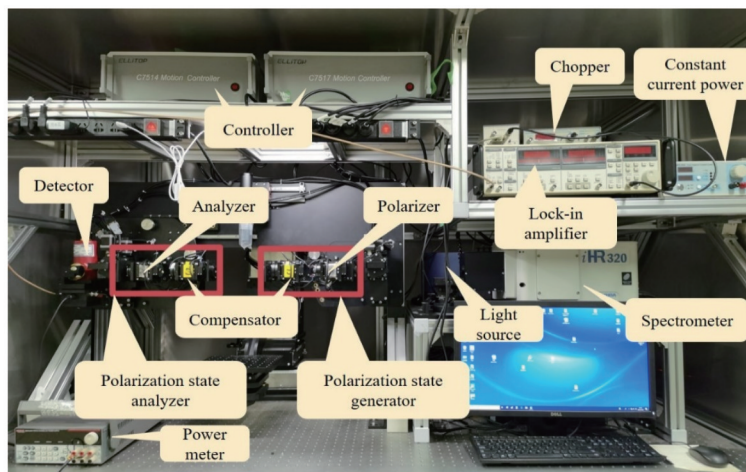


图 5 实验装置图

Fig. 5 Diagram of experimental device

系统探测强度稳定性测试(透射)如图 6 所示。由测试结果可知,整个测试过程分为三个部分:开机预热期(0~80 min)、信号稳定期(80~360 min)和信号衰减期(大于 360 min)。利用非线性拟合法测量时,采集一个数据点需 2 s,采集一组数据点(96 个数据点)共需 192 s;利用双旋转法测量时,采集一个数据点需 2 s,采集一组数据点(100 个数据点)共需 200 s。整个信号稳定期的探测光强标准差为 0.0110,在信号稳定期内随机截取 10 min 的探测数据,得到的标准差为 0.0071。

首先对起偏器 P 和检偏器 A 的透光轴进行了对准,具体方法为:在光源与起偏器 P 之间放置一个透光轴沿水平方向的标准偏振片,旋转检偏器 P,对得到的

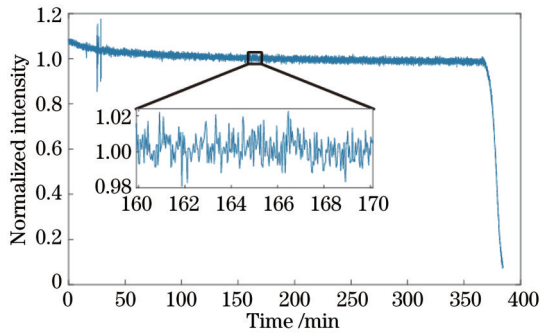


图 6 探测强度稳定性

Fig. 6 Stability of detection intensity

光强信号进行拟合,根据马吕斯定律 $I = I_0(\cos \theta)^2$ 得到起偏器 P 的安装方位角 θ_P ;使用相同的方法,利用起偏器 P 得到检偏器 A 的旋转方位角 θ_A 。最终得到的结果为 $\theta_P = -7.90^\circ, \theta_A = -13.50^\circ$ 。

4 定标与测试

4.1 偏振定标

除了常规的系统校准外,使用非线性拟合测量法和双旋转测量法对中红外穆勒矩阵椭圆仪的偏振元件进行了定标,并对比分析了两种不同测量方法获得的结果。

1)非线性拟合测量法

不放入待测样品时,由式(9)和(10)可求得补偿器 C_1 的初始方位角误差 $\Delta\theta_1$ 和相位延迟 δ_1 ,以及偏振分析器的偏振响应矩阵 X 分别为

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 &= 0.94^\circ, \\ \delta_1 &= 89.18^\circ, \\ X &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.5096 & -0.0041 & 0.0065 \\ -0.0018 & 0.2409 & 0.0166 & -0.0002 \\ 0.0015 & -0.0155 & 0.2410 & -0.0001 \\ -0.0005 & -0.0003 & -0.0005 & 0.5957 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

由 $X = M_D * M_{Mod}$ 可得到偏振响应矩阵 X 的理论表达式为

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1 + \cos \delta_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos \delta_2}{4} \cos(4\Delta\theta_2) & \frac{1 - \cos \delta_2}{4} \sin(4\Delta\theta_2) & 0 \\ 0 & -\frac{1 - \cos \delta_2}{4} \sin(4\Delta\theta_2) & \frac{1 - \cos \delta_2}{4} \cos(4\Delta\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sin \delta (1 + \sqrt{2})}{4} \cos(2\Delta\theta_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

对式(12)的实测值进行拟合,得到补偿器 C_2 的初始方位角误差 $\Delta\theta_2$ 和相位延迟 δ_2 。值得注意的是,由 $X_{12}, X_{22}, X_{33}, X_{44}$ 得出 δ_2 的 4 个值分别为 $88.8999^\circ, 87.9140^\circ, 87.9369^\circ$ 和 80.7470° ,可见,根据 X_{44} 求得的相位延迟 δ_2 与前三个差别较大。图 7 模拟了相位延迟 δ_2 从 0° 到 180° 变化时, X_{12}, X_{22}, X_{33} 和 X_{44} 值的变化。可知,当相位延迟接近 90° 时(C_2 为 $\lambda/4$ 波片), X_{44} 的函数斜率接近 0,相位延迟的差异反映在元素值上并不明显,故在计算相位延迟只使用 X_{12}, X_{22}, X_{33} 的拟合结果。最终得到补偿器 C_2 的初始方位角误差 $\Delta\theta_2$ 和相位延迟 δ_2 分别

$$\Delta\theta_2 = 1.27^\circ, \delta_2 = 88.25^\circ. \quad (14)$$

2)双旋转测量法

不放入样品时,可由式(11)定标得到空气的穆勒矩阵 M_{air} ,以及补偿器 C_1, C_2 的偏振参数 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \delta_1,$

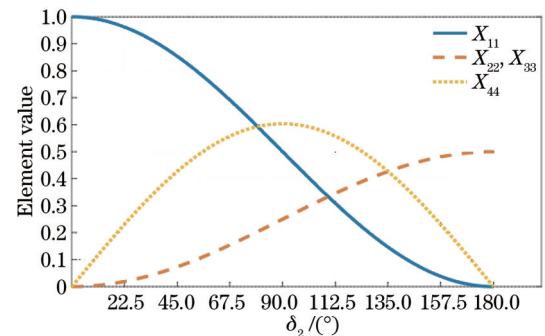


图 7 相位延迟与矩阵元素值的关系图

Fig. 7 Relationship between phase retardation and matrix element value

δ_2 , 实测结果如下:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 &= 1.09^\circ, \\ \delta_1 &= 88.77^\circ, \\ \Delta\theta_2 &= 1.18^\circ, \\ \delta_2 &= 89.21^\circ, \end{aligned}$$

$$M_{\text{air}} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0077 & -0.0023 & -0.0009 \\ 0.0074 & 0.9987 & 0.0079 & 0.0007 \\ 0.0017 & -0.0062 & 0.9998 & 0.0003 \\ -0.0001 & -0.0002 & 0.0030 & 0.9959 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对比式(12)、(14)和(15)中补偿器 C_1 、 C_2 的参数可以看出,方位角误差在 0.15° 以内,相位延迟测量误差在 0.96° 以内。此外,偏振响应矩阵 X 和空气穆勒矩

阵 M_{air} 的一些非零元素在一定程度上能够反映中红外穆勒矩阵椭偏仪的系统精度。非线性拟合测量法中,理论上偏振响应矩阵 X 除了 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{22} 、 X_{23} 、 X_{32} 、 X_{33} 、 X_{44} 以外所有元素均为零,那么这些非零值代表穆勒矩阵的测量误差在 0.0065 以内;理论上,双旋转测量法中 M_{air} 应为单位矩阵,非零元素表明穆勒矩阵的测量误差在 0.0079 以内。

4.2 样品测试

1) 透射样品

选用一个硒化镉延迟器作为透射样品,分别使用非线性拟合法和双旋转法测得(10次测量)的透射样品的穆勒矩阵和标准偏差分别为

$$\left\{ \begin{aligned} M_S^{(1)} &= \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0132 & 0.0041 & -0.0083 \\ -0.0010 & 1.0080 & -0.0226 & 0.0224 \\ 0.0029 & 0.0114 & 0.7686 & 0.6335 \\ -0.0131 & -0.0253 & -0.6464 & 0.7588 \end{bmatrix}, \\ \text{STD}(M_S^{(1)}) &= \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0050 & 0.0096 & 0.0033 \\ 0.0019 & 0.0051 & 0.0058 & 0.0054 \\ 0.0014 & 0.0071 & 0.0090 & 0.0100 \\ 0.0025 & 0.0059 & 0.0006 & 0.0038 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{aligned} M_S^{(2)} &= \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0049 & 0.0037 & -0.0114 \\ -0.0031 & 1.0027 & -0.0271 & 0.0303 \\ -0.0112 & -0.0047 & 0.7655 & 0.6385 \\ -0.0025 & -0.0426 & -0.6287 & 0.7600 \end{bmatrix}, \\ \text{STD}(M_S^{(2)}) &= \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0021 & 0.0019 & 0.0016 \\ 0.0034 & 0.0023 & 0.0046 & 0.0018 \\ 0.0030 & 0.0041 & 0.0034 & 0.0001 \\ 0.0010 & 0.0068 & 0.0019 & 0.0012 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

式中: $M_S^{(1)}$ 为非线性拟合测量结果; $M_S^{(2)}$ 为双旋转测量结果; STD 代表待测样品 10 次测量的标准偏差。两种方法的穆勒矩阵之差为

$$\Delta M = |M_S^{(1)} - M_S^{(2)}| = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0083 & 0.0004 & 0.0031 \\ 0.0021 & 0.0053 & 0.0045 & 0.0079 \\ 0.0141 & 0.0067 & 0.0031 & 0.0050 \\ 0.0106 & 0.0173 & 0.0177 & 0.0012 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

对比式(16)~(18)可以发现:透射样品的重复测量精度在 0.01 以内,两种测量方法获得的穆勒矩阵误差在 0.0177 以内。总体而言,对于透射样品,两种方法的测量精度和重复精度基本一致,穆勒矩阵测量误差约为 0.02,重复精度约为 0.01。

2) 反射样品

选用了—个铝膜反射镜(铝膜表面镀有一层二氧化硅保护膜)作为反射样品,测试了中红外穆勒矩阵椭偏仪的反射性能。图 8 为两种方法的穆勒矩阵测量结果,其中横坐标为入射角度,纵坐标为穆勒矩阵的 16 个矩阵元,圆圈、五角星所在曲线分别代表非线性拟合

和双旋转两种方法的测量结果。椭偏仪的入射角从 45° 至 70° ,每隔 5° 测量—组穆勒矩阵,每个人射角测量 10 次以计算标准偏差。图 9 为与图 8 对应的 10 次测量标准偏差。

由图 8 和图 9 可知,两种测量方法的穆勒矩阵误差在 0.02 以内,与透射样品测量误差—致;重复测量误差约为 0.02,比透射样品大一倍,其主要原因是反射光路更长导致系统信噪比降低。此外,从图 8 穆勒矩阵随入射角度的变化趋势可以看出,穆勒矩阵元素 M_{12} 、 M_{21} 、 M_{34} 和 M_{43} 随入射角的变化明显增大且曲线呈对称(或反对称)形式,与标准反射膜的穆勒矩阵趋势相吻合。然而,值得注意的是, M_{34} 和 M_{43} 随入射角的变化较大。

5 结 论

设计并建立了一套中红外穆勒矩阵椭偏仪,使用非线性拟合法和双旋转法两种测量方法对该椭偏仪进行对比定标以及测试。定标结果表明:补偿器方位角和相位延迟的定标误差分别为 0.15° 和 0.96° ;偏振响应矩阵 X 和空气穆勒矩阵 M_{air} 的非零元素表明,椭偏

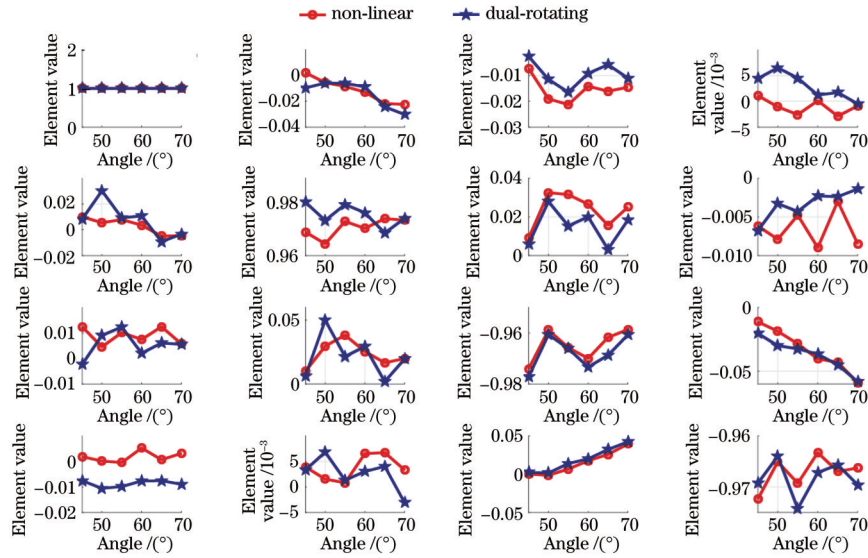


图 8 反射样品的穆勒矩阵

Fig. 8 Mueller matrices of reflected sample

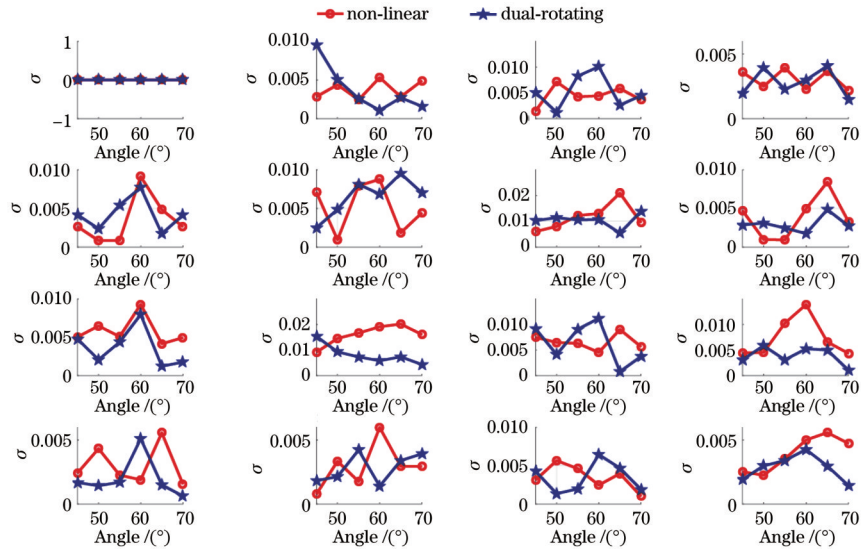


图 9 图 8 中穆勒矩阵对应的标准偏差 σ

Fig. 9 Corresponding standard deviation σ of Mueller matrices in Fig. 8

仪的测量误差在 0.0079 以内。随后通过透射样品和反射样品对红外穆勒矩阵椭偏仪的性能进行了进一步测试,结果表明:两种方法对于透、反射样品的穆勒矩阵测量精度基本保持一致,约为 0.02;但反射样品的重复测量标准差(0.02)比透射样品(0.01)大一倍,其主要原因是:反射光路更长导致系统信噪比下降。基于两种方法的比对定标和测试表明,该椭偏仪在中红外波段测量时具有较高的灵敏度与可靠性。尽管该系统的测量精度(0.02)没有满足 AIMS 望远镜的测量要求(0.01),但实际上 0.01 的测量需求主要针对太阳强磁场而言(0.1 T 磁场),AIMS 的主要科学目标是高灵敏度弱磁场测量,0.02 的偏振串扰精度可以满足大多数弱磁场的测量需求(0.05 T 以下)。

值得注意的是,在反射样品测量中,穆勒矩阵元素

M_{34} 和 M_{43} 随入射角的变化较大,变化机理有待进一步分析;目前的测量仅集中于 $12.32 \mu\text{m}$,后续将进一步扩展到更宽的光谱范围;此外,系统的测量精度受限于系统的信噪比,如何进一步提高信噪比也是该椭偏仪下一步的重点研究内容。

参 考 文 献

- [1] Shashar N, Rutledge P, Cronin T. Polarization vision in cuttlefish in a concealed communication channel? [J]. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199(9): 2077-2084.
- [2] Roslund C, Beckman C. Disputing Viking navigation by polarized skylight[J]. Applied Optics, 1994, 33(21): 4754-4755.
- [3] Kahr B, Claborn K. The lives of Malus and his

- bicentennial law[J]. *ChemPhysChem*, 2008, 9(1): 43-58.
- [4] 孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501001.
Sun X J, Li H, Tang L P. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501001.
- [5] 高瑞娟, 王春华, 宁金星, 等. 基于 Mueller 矩阵的生物细胞偏振显微成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811023.
Gao R J, Wang C H, Ning J X, et al. Polarization microscopy imaging of biological cells based on Mueller matrix[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811023.
- [6] 刘杰, 李建欣, 柏财勋, 等. 傅里叶变换高光谱 Mueller 矩阵成像理论与方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0711004.
Liu J, Li J X, Bai C X, et al. Theory and method of Fourier transform hyperspectral Mueller matrix imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0711004.
- [7] 苗政委, 汤媛媛, 魏凯, 等. DRC-MME 高级参数模型直通标定实验的自由度分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2012003.
Miao Z W, Tang Y Y, Wei K, et al. Degree of freedom analysis of dual-rotating compensator Mueller matrix ellipsometer through calibration experiments based on advanced parameter model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2012003.
- [8] Hou J F, Wang D G, Deng Y Y, et al. Error analysis and optimal design of polarization calibration unit for solar telescope[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(8): 089501.
- [9] Azzam R M A, Bashara N M, Ballard S S. Ellipsometry and polarized light[J]. *Physics Today*, 1978, 31(11): 72.
- [10] 侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 基于非线性最小二乘拟合合法的 Mueller 矩阵椭偏仪[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408004.
Hou J F, Wang D G, Deng Y Y, et al. Mueller matrix ellipsometer based on nonlinear least squares fitting method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0408004.
- [11] Bickel W S, Bailey W M. Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light[J]. *American Journal of Physics*, 1985, 53(5): 468-478.
- [12] Azzam R M. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal[J]. *Optics Letters*, 1978, 2(6): 148.
- [13] Compain E, Poirier S, Drevillon B. General and self-consistent method for the calibration of polarization modulators, polarimeters, and Mueller-matrix ellipsometers[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(16): 3490-3502.
- [14] 刘柠林. 中红外穆勒矩阵椭偏测量系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 1-9.
Liu N L. Research on mid-infrared Mueller matrix spectroscopic ellipsometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 1-9.
- [15] 何思源, 周芷茵, 田小凡, 等. 不同入射角下物体的穆勒矩阵[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1726001.
He S Y, Zhou Z Y, Tian X F, et al. Investigating the Mueller matrix of objects at different incident angles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1726001.
- [16] Skumanich A, Lites B W, Pillet V M, et al. The calibration of the advanced stokes polarimeter[J]. *The Astrophysical Journal Letters Supplement Series*, 1997, 110(2): 357-380.
- [17] Collins R W, Koh J. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer: instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(8): 1997.