

1 m 红外太阳望远镜折轴光路与封窗偏振建模

刘维维^{1,2} 袁 沐¹ 金振宇¹

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过精确的偏振测量实现太阳中低层磁场遥感是1 m口径红外太阳望远镜的重要科学任务。为了实现高精度高效率的系统偏振定标,需要对望远镜系统进行偏振建模。分析了该望远镜折轴光路仪器偏振的周天和季节变化,以及望远镜真空封窗的应力双折射效应。结果显示折轴光路的偏振效应主要表现为线偏振与圆偏振之间的交扰,交扰程度最大达0.7。同时,由于像旋速度巨大,临近夏至期间太阳接近中天时偏振交扰会呈现一个震荡过程。封窗在重力和真空载荷的共同作用下,总的偏折特性可等效为一个位相延迟片;并且延迟量随望远镜高度角变化而变化。当望远镜指向水平时偏振交扰最明显,达 1.2×10^{-2} 。

关键词 物理光学; 太阳望远镜; 仪器偏振; 偏振模拟; 双折射

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0826001

Polarization Modelling of Coude Optics and Vacuum Window for the New Vacuum Solar Telescope

Liu Weiwei^{1,2} Yuan Shu¹ Jin Zhenyu¹

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An important scientific task of new vacuum solar telescope (NVST) is to obtain the middle and lower magnetic field of solar by accurate polarization measurement. In order to achieve high precision and high efficiency systematic polarization calibration, it is needed to build a polarization model for the telescope. This article analyzes the telescope instrumental polarization changes of coude optical path over days and seasons, and birefringence effects of its vacuum window. The result shows: the main crosstalk of Coude optical path is between linear polarization and circuit polarization, whose maximum number is 0.7. In the meantime, when the sun approaches midheaven around the summer solstice, the curve of crosstalk becomes shocked since dramatic derotation. And the total polarization property of vacuum window is equivalent to a retarder which changes along with the altitude of telescope. It becomes obvious when the telescope points are horizontal and the crosstalk increases to 1.2×10^{-2} .

Key words physical optics; solar telescope; instrumental polarization; polarization modelling; birefringence

OCIS codes 260.5430; 120.4640; 260.1440

1 引 言

1 m 红外太阳望远镜(NVST)是我国自主研发的新一代地基光学及近红外太阳观测设备,是我国目前最大的光学太阳望远镜,同时也是世界上最大的真空太阳望远镜。NVST的重要科学任务之一是通过高精度的二维偏振光谱观测获得太阳中低层大气的矢量磁图。由云南天文台抚仙湖太阳观测站与国家天文台怀

收稿日期: 2015-03-13; 收到修改稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11303089)

作者简介: 刘维维(1989—),男,硕士研究生,主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: liuww@ynao.ac.cn

导师简介: 金振宇(1971—),男,博士,研究员,主要从事天文技术与方法、天文高分辨观测技术方面的研究。

E-mail: kim@ynao.ac.cn

*通信联系人: E-mail: yuanshu@ynao.ac.cn

柔太阳观测站合作研发了二维偏振光谱观测系统已经完成,并在 532.4 nm 谱线实现了初光,期望系统的偏振测量精度能够达到 10^{-3} 。

光学系统对入射偏振态的改变被称为仪器偏振,它是影响太阳磁场偏振测量精度的主要因素。系统偏振定标是克服仪器偏振的直接手段,即通过测量已知偏振态获得系统的偏振响应特性。当观测时就可以利用该特性将测量信号还原为进入系统之前的原始偏振信号。NVST 的仪器偏振主要来自于折轴光路和真空封窗,其表现为斯托克斯参数中 Q 、 U 和 V 信号之间的交扰。为此,NVST 在格里高利焦点处设计了一个能够切入切出光路的偏振发生器,即偏振定标单元,用于对后续光路的偏振定标。对于像 NVST 这样的地平式系统,观测过程中望远镜光路的几何结构会发生不断变化,即望远镜的偏振响应是时间的函数,同时它也是波长和偏振测量调制方式的函数。因此单纯依靠定标来实现系统偏振特性的完备描述是十分困难的。通过建立系统偏振模型,并使用定标数据模型拟合的方法获得完备的系统偏振特性是解决这一问题的有效方法。目前这种半经验方法已经被广泛应用于太阳偏振观测设备的使用和设计中^[1-3]。偏振建模的另一重要的价值在于预见仪器偏振变化趋势,从而根据不同的科学观测目标优化定标和观测模式,最大限度地提高系统的测量精度。

本文首先建立 NVST 仪器偏振的 Muller 矩阵模型,然后讨论折轴光路仪器偏振的时间和季节特性,分析了真空和重力载荷对封窗的双折射影响,最后进行了讨论和展望。

2 NVST 仪器偏振的 Muller 矩阵

NVST 的光学系统是一个三镜格里高利系统,如图 1 所示,它由抛物面主镜 M1(有效口径 980 mm),椭球面副镜 M2,椭球面中继镜 M3,以及 4 块折轴反射镜 M4、M5、M6 和 M7 构成。系统共有三个焦点,即主镜焦点 F1,格里高利焦点 F2 和 Coude 焦点 F3。NVST 的全部终端设备都被安装在一个垂直旋转平台上,用于图像消旋。在 F1 处安装有热光阑,将视场限制为 5arcmin。F2 处计划安装一个能够切入切出光路的偏振定标单元,用于为后面折轴光路和偏振终端定标。终端群中与偏振测量有关的光学结构包括:狭缝扫描机构、狭缝监视器、磁分析器及垂直光谱仪。

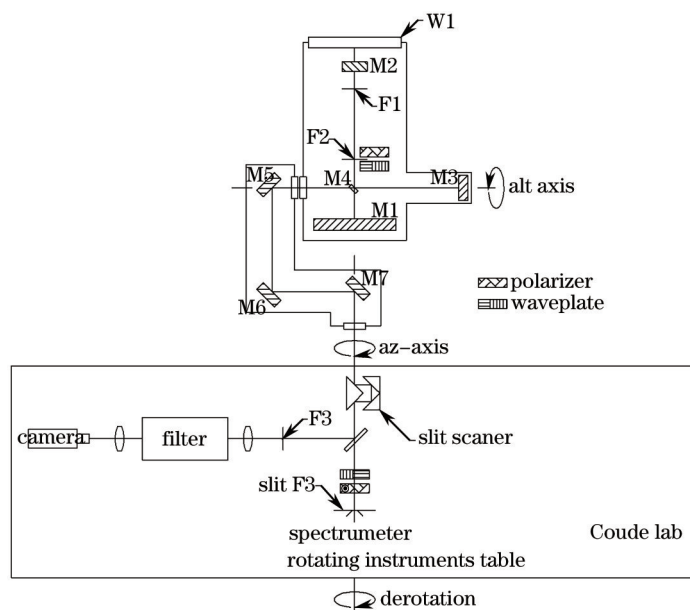


图 1 NVST 偏振测量系统光路

Fig.1 Optical path of NVST polarimetry

考虑到太阳偏振信号的部分偏振特性,使用 Muller 矩阵描述望远镜的偏振传递特性,如下式所示:

$$S_{out} = M_{Tel} S_{in}, \quad (1)$$

式中 $S_{in} = (I, Q, U, V)^T$ 为进入望远镜之前偏振信号的斯托克斯参数, S_{out} 为到达磁分析器的斯托克斯参数, M_{Tel} 为望远镜的 Muller 矩阵。根据 Muller 矩阵的基本性质,系统总 Muller 矩阵等于各光学元件 Muller 矩阵按传播顺序依次左乘,因此(1)式可以展开为

$$S_{out} = M_{Inst} R(\theta_2) M_7 M_6 M_5 R(E) M_3 M_4 M_2 M_1 W R(\theta_1) S_{in} \quad (2)$$

式中 $M_1 \sim M_7$ 为反射镜 M1~M7 的 Muller 矩阵; W 为真空封窗的 Muller 矩阵, M_{Inst} 为 M7 与磁分析器之间全部光学元件的总 Muller 矩阵, 它包括了狭缝扫描中的四面反射镜以及分光镜; $R(\theta)$ 为旋转矩阵, 它表征了元件间的坐标旋转

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

(2)式中的两个旋转角分别为

$$\theta_1 = \theta_p + \theta_q, \quad (4)$$

$$\theta_2 = \theta_p + \theta_q + E, \quad (5)$$

式中 θ_p 为赤道坐标系相对于地平坐标系的像旋角, θ_q 为磁分析器与 Q 方向相对于赤经轴的角度之和, E 为望远镜的高度角。

考虑到狭缝扫描与分束镜 Muller 矩阵是常数, 以及其膜系的复杂性, M_{Inst} 需要通过测量获得, 该部分内容超出了本文的讨论范围, 因此暂时不考虑它的影响。根据之前的研究, NVST 主光路的净偏振完全可以忽略^[4], 则剩下的折轴光路表示为

$$M_{Fold} = R(\theta_2) M_7 M_6 M_5 R(E) M_3 M_4 R(\theta_1). \quad (6)$$

下面将对 M_{Fold} 和封窗 W 两个矩阵进行具体分析。

3 折轴光路偏振建模

考虑到 F2 与 F3 处大焦比和小视场的特点, 不同光线在反射镜上的入射角差别非常小, 因此使用主光线的 Muller 矩阵代表全部光线 Muller 矩阵的平均。

(6)式中 M_3 是正入射, 因此其 Muller 矩阵表示为

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

NVST 平面反射镜表面仅镀有金属铝膜, 其 Muller 矩阵的形式为

$$M(\rho_s, \rho_p, \Delta) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \rho_s^2 + \rho_p^2 & \rho_s^2 - \rho_p^2 & 0 & 0 \\ \rho_s^2 - \rho_p^2 & \rho_s^2 + \rho_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\rho_s \rho_p \cos \Delta & 2\rho_s \rho_p \sin \Delta \\ 0 & 0 & -2\rho_s \rho_p \sin \Delta & 2\rho_s \rho_p \cos \Delta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中 ρ_s 与 ρ_p 分别是铝膜垂直与平行振动分量的振幅反射率, Δ 是两分量间的位相延迟。根据金属光学中的菲涅耳公式, 振幅反射率可以表示为

$$\rho_s \exp(i\phi_s) = \frac{\cos i - n \cos r}{\cos i + n \cos r}, \quad (9)$$

$$\rho_p \exp(i\phi_p) = \left(\frac{n \cos r - \cos i}{n \cos r + \cos i} \right) \left(\frac{n \cos r \cos i - \sin^2 i}{n \cos r \cos i + \sin^2 i} \right), \quad (10)$$

式中 i 为入射角, r 为折射角, n 为金属的复折射率。这里菲涅耳公式仍然成立, 因此可以将方程中的 $n \cos r$ 表示为

$$n \cos r = \sqrt{n^2 - \sin^2 i}. \quad (11)$$

金属的复折射率是波长的函数^[5], 图 2 给出了 45° 入射时, 铝膜反射镜 Muller 矩阵中 $M(2,1)$ 和 $M(3,4)$ 两个阵元在可见光到近红外波段的变化。532.4 nm 处的 45° 入射的 Muller 矩阵为

$$M_{Refl} = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0307 & 0 & 0 \\ 0.0307 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.9768 & -0.2120 \\ 0 & 0 & 0.2120 & -0.9768 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

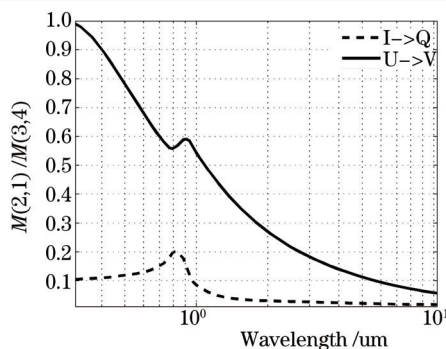


图2 45°入射时平面反射镜 Muller矩阵阵元 $M(2,1)$ 和 $M(3,4)$ 随波长的变化

Fig.2 $M(2,1)$ and $M(3,4)$ of plane mirror with different waves while the incident angle is 45°

在地平坐标系下天体高度角 E 与像旋角 θ_p 随时角 h 的变化^[6]为

$$E(h) = \arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh), \quad (13)$$

$$\theta_p(E) = \arccos\left(\frac{\sin \delta - \sin E \sin \phi}{\cos E \cos \phi}\right), \quad (14)$$

式中 ϕ 是望远镜的地理纬度, δ 是太阳的赤纬。将 NVST 的地理纬度代入(13)式和(14)式,得到了不同季节太阳高度和像旋角随当地时间的变化情况,如图3所示。需要指出的是,就 NVST 而言,随着临近夏至,在太阳接近中天时像旋角变化剧烈,为此光谱仪的消旋速度非常快,导致望远镜的 Muller 矩阵也会随之发生剧烈变化。

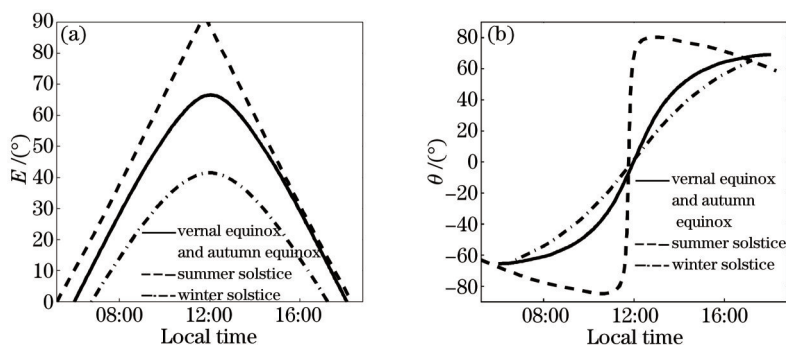


图3 不同季节 (a) 太阳高度角和 (b) 像旋角随当地时间的变化

Fig.3 (a) Solar attitude and (b) image rotation angle during a day in different seasons

将(13)式和(14)式代入(6)式,并且在不失一般性的前提下假设 $\theta_q = 0$, 则折轴光路 Muller 矩阵的周天变换情况如图4所示。从图中可以发现折轴光路的仪器偏振主要表现为矩阵中的 $M(4,2)$ 和 $M(4,3)$ 项,即 QV 和 UV 串扰,并且其轮廓随季节有明显变化。从图中可以看出,周天变化中 UV 和 QV 交扰最大值随季节变化并不明显,均在为0.7附近,但峰值出现的时刻却有一个缓慢的变化过程,太阳越高,最大值出现的时刻越接近于太阳中天的时刻。同样的趋势也发生在而 QU 串扰中,其最大值约为0.2。当观测时间接近夏至时,矩阵在太阳中天附近似乎表现出不连续情况。图5展示了中天前后20 min Muller 矩阵的情况,函数仍然是连续的,但存在一个快速震荡的过程。

4 封窗应力双折射偏振建模

下面将利用有限元方法和折射率椭球理论计算封窗玻璃的在真空和重力载荷作用下的 Muller 矩阵。

4.1 折射率椭球和应力双折射计算 Muller 矩阵的原理

NVST 的封窗使用的是 K9 玻璃,作为一种非晶体光学材料,在没有应力的条件下它的折射率椭球为圆球^[7]

$$\sum_{ij} B_{ij}^0 x_i x_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (15)$$

式中 x_{ij} 为折射率空间中的坐标,系数 $B_{11}^0 = B_{22}^0 = B_{33}^0 = \sqrt{1/n_0^2}$, n_0 为 K9 玻璃的折射率,其余的 B_{ij}^0 均为零。当存

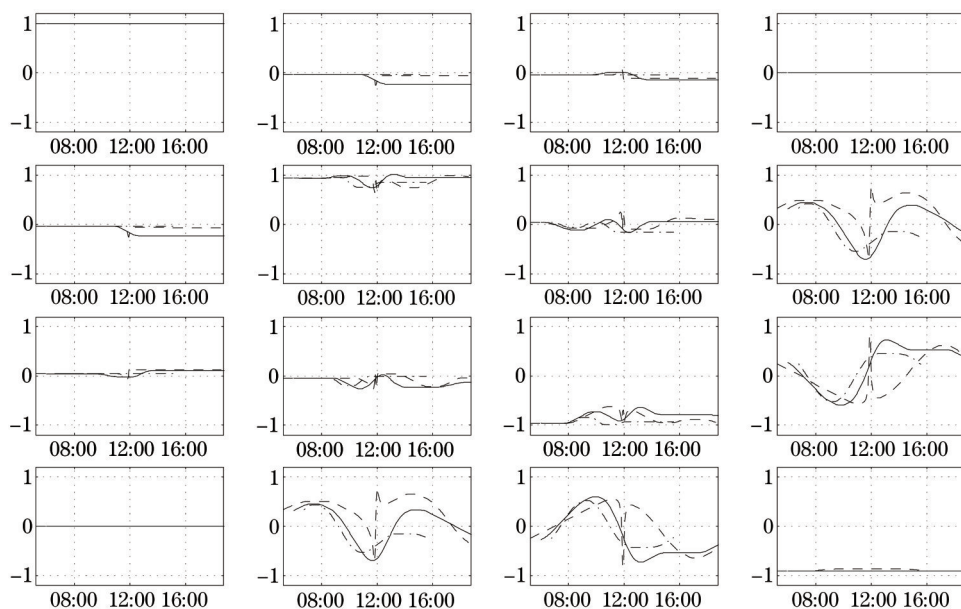


图 4 不同季节望远镜 Muller 矩阵 16 个阵元随时间的变化 (实线代表春秋分, 虚线代表夏至, 点划线代表冬至)

Fig. 4 16 elements of the telescope Muller matrix during a day in different seasons (solid line shows vernal equinox and autumn equinox, dotted line shows summer solstice, dot and dash line shows winter solstice)

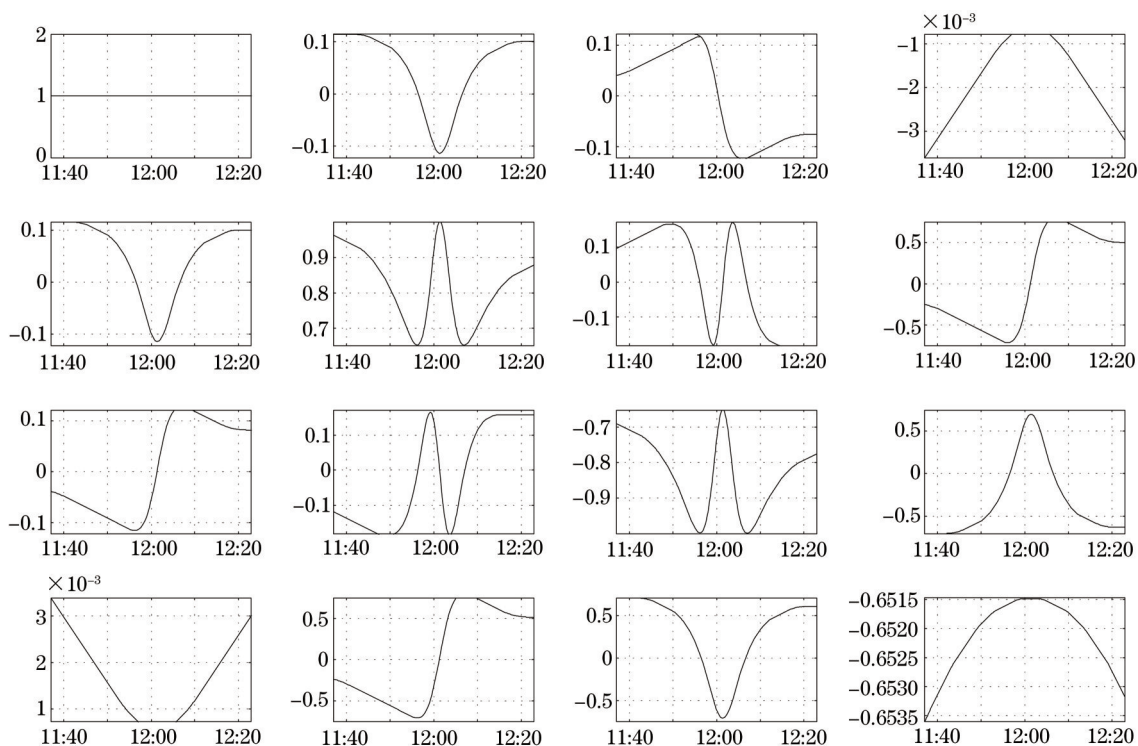


图 5 夏至望远镜接近中天时的 Muller 矩阵

Fig.5 Mueller matrix before and after the sun is near midheaven of summer solstice

在应力时折射率椭圆的主轴长度和方向会发生变化, 此时折射率椭圆方程变为^[7]

$$\sum_{ij} (B_{ij}^0 + \Delta B_{ij}) x_i x_j = 1, \quad (16)$$

式中系数变化量 ΔB_{ij} 与应变张量 δ_{kl} 满足^[7]

$$\Delta B_{ij} = q_{ijkl} \delta_{kl}, \quad (17)$$

式中 q_{ijkl} 为材料的弹光系数。根据材料的物理对称性, δ_{kl} 和 ΔB_{ij} 可以约化为 6×1 的向量, 同时弹光系数也变

为6×6的矩阵。对于各向同性的材料(17)式可以约化为^[8]

$$\begin{pmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{11} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{12} & q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

对于K9玻璃, $q_{11}=0.12, q_{12}=0.22$ ^[9]。且:

$$q_{44} = \frac{q_{11} - q_{12}}{2}. \quad (19)$$

(18)式给出了应变与折射率椭球变化的线性关系。如果设 x_2 为光传播方向, 那么平面 $x_2 = 0$ 在椭球上截取椭圆的长短轴即为 o 光和 e 光折射率。因此材料中某点的快轴方向可以表示成^[10]

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\Delta B_6}{\Delta B_1 - \Delta B_3} \right). \quad (20)$$

而延迟量可以表示为

$$\Delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{n_0^3}{2} (\Delta B_3 - \Delta B_1), \quad (21)$$

式中 L 为点格在光传播方向上的长度。从(20)式和(21)式可以看出, 材料内部的每一点都可以被看成是一个小位相延迟片。如果用 m 表示材料中沿光传播方向上有限元网格编号, 用 n 表示垂直于传播方向的平面内格子的编号, 则封窗上格子 n 的 Muller 矩阵可以表示为

$$w_n = \prod_m R(-\gamma_{mn}) D(\Delta_{mn}) R(\gamma_{mn}), \quad (22)$$

式中^[8]

$$D(\Delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Delta & \sin \Delta \\ 0 & 0 & -\sin \Delta & \cos \Delta \end{pmatrix}. \quad (23)$$

而整个封窗总的 Muller 矩阵可以表示为

$$W = \frac{\sum_n a_n w_n}{\sum_n a_n}, \quad (24)$$

式中 a_n 为格子 n 的面积。

4.2 有限元分析计算

K9玻璃的弹性模量为81.32GPa,泊松比为0.209,密度为2530 kg/m³^[11]。利用Ansys软件进行封窗有限元分析,其网格划分如图6所示。由于真空封窗四周有真空压胶封装,在Ansys软件中设定边界节点所有自由度为零。抚仙湖湖面海拔在1722.5 m,采用湖面大气压约为82.3 KPa。考虑到主镜筒内气压在观测过程中维持在80 Pa左右,设玻璃封窗真空压力为82.22 KPa。图7给出了仅施加真空载荷时 Muller 矩阵右下角3×3阵元在封窗上的分布(灰度值越高,代表的值越大)。可以看出在封窗边缘 QUV 交扰比较明显。

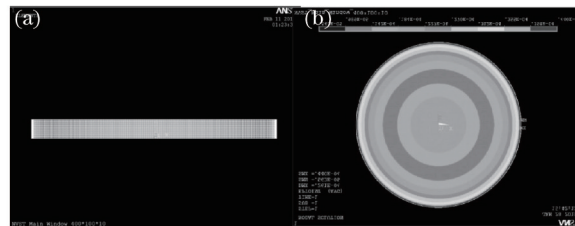


图6 (a) Ansys有限元分析网格划分; (b) 应变分布云图

Fig.6 (a) Mesh generation of Ansys finite element analysis; (b) strain intensity of vacuum window

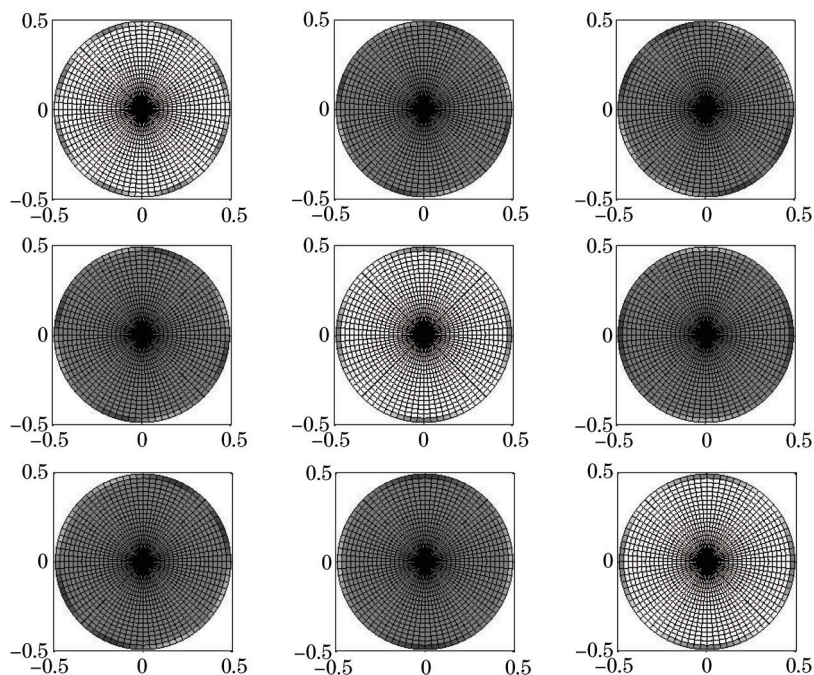


图7 仅施加真空载荷时封窗 Muller矩阵分布

Fig.7 Mueller matrix under pressure of vacuum and gravity

当附加上重力的影响时,并增加网格划分密度的情况下,根据(24)式,得到了波长 532.4nm 时望远镜指向天顶和水平方向两种情况下封窗总的 Muller 矩阵为

$$W(E = 90^\circ) = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0001 \\ 0 & 0.0000 & 1.0000 & -0.0043 \\ 0 & -0.0001 & 0.0043 & 1.0000 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

$$W(E = 8^\circ) = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0001 \\ 0 & 0.0000 & 0.9999 & -0.0124 \\ 0 & -0.0001 & 0.0124 & 0.9999 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

比较(23)式和以上结果可以看出真空和重力载荷使封窗成为了一个位相延迟片,其延迟量在 $0.25^\circ \sim 0.71^\circ$ 之间。且随着望远镜高度降低,其延迟量变大。由(25)、(26)式中 $M(3,4)$ 和 $M(4,3)$ 可知,在真空和重力下,封窗对偏振斯托克斯信号中 U 和 V 产生较大交扰,在 90° 和 8° 时分别为 4.3×10^{-3} 和 1.24×10^{-2} 。

5 结 论

NVST 的仪器偏振主要来自望远镜的折轴光路和真空封窗,并且它们都是时间和波长的函数。折轴光路的偏振效应主要表现为线偏振与圆偏振之间的交扰,交扰程度最大达到了 0.7。此外,不同方向的线偏振态之间也存在一定程度的交扰,程度最大不超过 0.2。望远镜 Muller 矩阵周天和季节变化都非常显著,主要表现为冬季的矩阵平滑且幅度小,夏季的矩阵陡峭且幅度大。特别是临近夏至时,在太阳接近中天的前后 10 min 内 Muller 矩阵会呈现出一个强烈的震荡过程,这是此刻的图像消旋速度过快所致。真空封窗的偏振效应主要来自真空载荷与重力载荷引起的内部应力变形,并且它是望远镜高度的函数。封窗偏振特性类似于一块延迟可变的波片,当望远镜指向天顶时它的 UV 交扰项为 4.3×10^{-3} ,而当望远镜指向接近水平时交扰程度将增大到 1.24×10^{-2} 。总的来说折轴光路的偏振效应要比封窗大两个数量级,但封窗的变化要更加复杂。

从上面的结论可以看出,并不是任何时候都适合定标观测。例如夏季正午矩阵变化过快时就不适合定标。而从模型拟合的角度讲,在矩阵变化较快时段应使用更为密集定标点拟合,这样有利于对随机误差的抑制。另一方面,如果仅在格里高利焦点进行定标,则封窗的偏振无法被消除,必须采取其他手段对封窗专门进行定标,如使用尽量靠近太阳日面中心的黑子本影区进行定标,因为这里的磁场是平行于视向的,仅包

含圆偏振成分。或者设计一个能够安装在封窗之前的大口径定标装置。

介绍了一种标准的地平望远镜偏振建模过程。针对不同望远镜光学结构,其Muller矩阵的结构也会有所不同,但该建模方法对其他望远镜是适用的。

参 考 文 献

- 1 A Skumanich, B W Lites, V Martinez Pillet, *et al.*. The Calibration of the advanced stokes polarimeter[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1997, 110(2): 357-380.
- 2 J Kiyohara, Satoru Ueno, Reizaburo Kitai, *et al.*. Calibration of the instrumental polarization of the domeless solar telescope at the Hida observatory[J]. SPIE, 2004, 5492: 1778-1785.
- 3 C Beck, R Schliohenmaier, M Collados, *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.
- 4 S Yuan. Polarization model for the new vacuum solar telescope[C]. APS Conference, 2014, 489: 297-304.
- 5 Rakic, A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum[J]. Appl Optics, 1995, 34(22): 4755-4767.
- 6 Liu Guangqian. Research and Realization on Control System of One Meter Infrared Solar Telescope[D]. Kunming: Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2011: 13-14.
柳光乾. 1米红外太阳望远镜控制与系统研制[J]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2011: 13-14.
- 7 Shi Shunxiang, Wang Xue'en, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics[M]. xi'an: Xidian University Publisher.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- 8 Li Jiawei, Zhu Baoguang, Wei Guanghui. Crystallographic Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1989.
李家泽, 朱宝光, 魏光辉. 晶体光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.
- 9 Marvin J. Weber, Handbook of Optical Materials[M]. Florida: CRC Press LLC, 2003.
- 10 K B. Doyle, Victor L Genberg, Gregory J Michels. Numerical methods to compute optical errors due to stress birefringence[C]. SPIE, 2002: 4769: 1-9.
- 11 Li Shixian, Li Lin. Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
李世贤, 李 林. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

栏目编辑: 韩 峰