

用于空间目标偏振探测的望远镜系统偏振分析

王国聪^{1,2} 王建立¹ 张振铎¹ 明 名¹ 张 斌¹ 曾 蔚³

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250001)

摘要 基于地基大口径自适应望远镜构建成像偏振探测系统,可以同时获取空间目标的光强和偏振图像,将光强信息和偏振信息相结合,能为空间目标的探测和识别提供更多依据。现有的1.23 m自适应望远镜在设计时并未采用保偏设计,在开展观测研究前需得到光学系统的偏振传输特性。但目前难以直接对大口径望远镜进行偏振标定,为了分析1.23 m自适应望远镜光学系统的偏振传输特性,基于相干矩阵和光线追迹法建立了望远镜系统偏振传输特性分析模型。仿真得出了1.23 m自适应望远镜光学系统的偏振传输特性,发现光学系统会引入较大的偏振探测偏差。为减小偏振探测偏差,给出了一个可行的保偏改进方案,并通过已建立的模型验证了该方案的有效性。

关键词 成像系统;偏振;空间目标;大口径望远镜;成像探测;相干矩阵;数值分析

中图分类号 TP7; O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1211003

Polarization Analysis of the Telescope System Used for Space Target Polarization Detection

Wang Guocong^{1,2} Wang Jianli¹ Zhang Zhenduo¹ Ming Ming¹ Zhang Bin¹ Zeng Wei³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

³ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250001, China

Abstract The polarization imaging system based on large aperture ground-based adaptive telescope can acquire both intensity image and polarization image at the same time. Richer information for detecting and identifying space target can be provided by the combination of intensity and polarization. Because the polarization-maintaining design of the 1.23 m ground-based adaptive telescope is ignored, the telescope's polarization properties on propagation should be known before experiments. But it is difficult to calibrate the polarization properties of large aperture telescope. To analyze the polarization properties of the 1.23 m ground-based adaptive telescope, an analysis model based on coherent matrices and ray tracing formulas is constructed. By simulation, impact of the optical system on the accuracy of polarizing detection is found. An improved scheme to decrease the deviation of polarizing detection is given and its effectiveness is identified by the model constructed above.

Key words imaging systems; polarization; space target; large aperture telescope; imaging detection; coherent matrices; numerical analysis

OCIS codes 110.6770; 260.5430; 280.4991

1 引 言

国内外相关研究证明人造空间目标具有明显的

偏振特性。Stead^[1]利用光电望远镜发现人造空间目标散射光有一定的偏振度,最大的可达0.39。

收稿日期: 2014-06-20; 收到修改稿日期: 2014-07-21

作者简介: 王国聪(1988—),男,博士研究生,主要从事偏振成像探测及图像处理等方面的研究。

E-mail: wangguocong0215@163.com

导师简介: 王建立(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn(通信联系人)

Sancheza 等^[2]利用美国星火靶场 3.5 m 望远镜对多个同步轨道卫星进行了偏振观测,研究了同步轨道卫星散射光的偏振特性的变化规律。李雅男等^[3-4]对空间目标的偏振观测也表明人造空间目标散射光具有明显的偏振特性,并可以基于获得的偏振特性变化对空间目标的运行姿态进行分析。Bush 等^[5]基于 TASAT 模型分析了几个典型的低轨空间目标,研究了低轨空间目标的散射光偏振特性。以上研究为开展针对空间目标的偏振探测提供了依据,同时一些理论研究和实验室内实验表明,空间目标散射光偏振特性与目标表面材料属性、表面形态和太阳、目标与观测者三者之间的几何关系有关,基于偏振特性可以有效地区分空间目标表面材料和结构差异,可以分析空间目标的姿态变化^[6-11],因此偏振成像是一种能有效地对空间目标进行探测和识别的新方法。

目前国内已开展的空间目标偏振探测研究是针对点目标的,若能利用地基大口径自适应望远镜开展面目标成像偏振探测,得到空间目标的高分辨率偏振图像,则可以得到更加丰富的局部目标散射光的偏振特性,能为空间目标的探测与识别提供更多的依据。

现有的 1.23 m 自适应望远镜在设计之初并未采用保偏设计,需对其光学系统的偏振传输特性进行分析^[12-13],但现有技术条件下直接对大口径光学系统进行偏振标定难度大、不易实现^[14-15]。本文结合相干矩阵和光线追迹构建了反射式望远镜的偏振传输特性模型,用于分析基于 1.23 m 自适应望远镜构建的偏振成像探测系统的偏振传输特性,得到了光学系统会引入的偏振探测偏差。根据理论分析和仿真结果,给出了一个可行的保偏改进方案,由光学结构改造和后期图像修正方法构成。该方案能大幅减小望远镜光学系统引入的偏振探测偏差,为开展后续技术研究和搭建观测实验系统奠定了基础。

2 理论分析

1.23 m 自适应望远镜光学系统中的主次镜及后续折转光路中各反射镜均采用保护铝反射镜。由于铝的消光系数较大,铝膜在平行入射面(P 向)和垂直入射面(S向)方向的反射率不同,并且有不同

的附加相位差,会改变入射光的偏振特性。基于相干矩阵和琼斯矩阵可以对望远镜系统的偏振传输特性进行分析^[16-18]。

望远镜主次镜及部分折转光路结构如图 1 所示,主镜和次镜均为非球面,入射到主镜不同位置上的入射光反射角不同;另外,自适应成像光路中有复杂的折转光路,会聚光束入射到同一反射镜不同位置时的入射面和入射角不同,因此需进行分面元分析。如图 2 所示,在望远镜主镜镜面上建立极坐标系,将主镜分为若干微面元,采用空间矢量法对入射到某一面元位置 (r, φ) 上的光线进行追迹,得到后续每次反射时光线的出射方向矢量、入射面的法线方向矢量和入射角。由以上三个量可以进一步得出建模所需的光线的传输路径、P 光与 S 光的反射率和附加相位差以及两次反射间的入射面旋转角度。

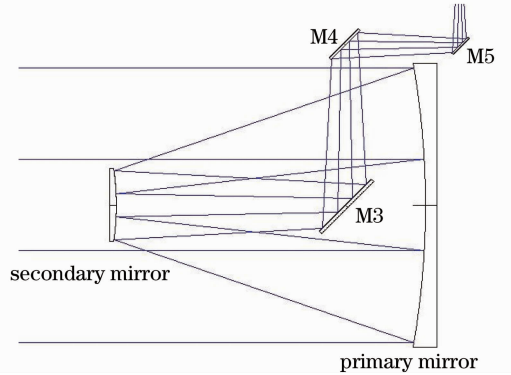


图 1 大口径望远镜部分光路结构

Fig. 1 Partial optical path of the large aperture telescope

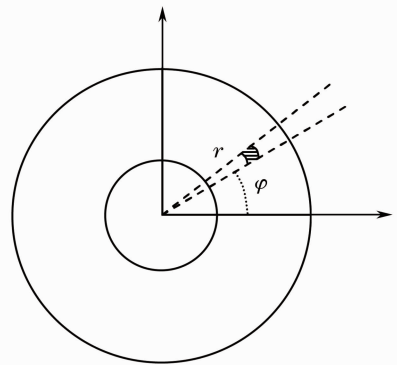


图 2 主镜面元划分示意图

Fig. 2 Segmentation of the primary mirror

望远镜主镜一个面元 (r, φ) 位置对应的入射光的相干矩阵为 $J_i(r, \varphi)$,经过 n 次反射后出射光的相干光矩阵可以表示为

$$J_0(r, \varphi) = T_n(r, \varphi)R_n(r, \varphi) \cdots R_2(r, \varphi)T_2(r, \varphi)R_1(r, \varphi)T_1(r, \varphi)J_i(r, \varphi) \cdot T_1^+(r, \varphi)R_1^+(r, \varphi)T_2^+(r, \varphi)R_2^+(r, \varphi) \cdots T_n^+(r, \varphi)R_n^+(r, \varphi), \quad (1)$$

式中 $\mathbf{T}_n(r, \varphi) = \begin{cases} r_{Pn}(r, \varphi) \exp[i\delta_{Pn}(r, \varphi)] & 0 \\ 0 & r_{Sn}(r, \varphi) \exp[i\delta_{Sn}(r, \varphi)] \end{cases}$ 为第 n 个反射镜的琼斯矩阵, $r_{Pn}(r, \varphi)$ 和 $r_{Sn}(r, \varphi)$ 分别为 P 光和 S 光反射率, $\delta_{Pn}(r, \varphi)$ 和 $\delta_{Sn}(r, \varphi)$ 分别为 P 光和 S 光附加相位差; $\mathbf{R}_n(r, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \phi_n(r, \varphi) & \sin \phi_n(r, \varphi) \\ -\sin \phi_n(r, \varphi) & \cos \phi_n(r, \varphi) \end{bmatrix}$ 为第 $n-1$ 个和第 n 个反射镜间的本征坐标系的旋转矩阵, $\phi_n(r, \varphi)$ 为旋转角度, 该旋转角度通过前文提到的光线追迹法和空间矢量分析求出; \mathbf{T}^+ 为 \mathbf{T} 的转秩共轭矩阵。

经过望远镜光学系统传输, 通过线偏振片后的相干矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_\alpha(r, \varphi) = \mathbf{T}_\alpha \mathbf{R}(r, \varphi) \mathbf{J}_0(r, \varphi) \mathbf{R}^+(r, \varphi) \mathbf{T}_\alpha^+, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{R}(r, \varphi)$ 为入射面旋转到偏振成像探测系统参考面的旋转矩阵, \mathbf{T}_α 为线偏振片琼斯矩阵, α 为线偏振片透偏方向与偏振成像探测参考面的夹角。

相关研究发现^[7]: 空间目标反射的光为部分偏振光, 且偏振部分可以认为均是线偏振光。因此, 通过获取 0° 、 60° 、 120° 三个透偏方向上的光强图像, 并进行相应处理获得目标的斯托克斯矢量图像, 从而可以提取出目标反射光的偏振信息^[19]。 0° 、 60° 、 120° 透偏方向的光强通过对所有面元光强求和得出:

$$I_\alpha = \sum_r \sum_\varphi \text{tr} \mathbf{J}_\alpha(r, \varphi), \quad (\alpha = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ), \quad (3)$$

式中 $\text{tr} \mathbf{J}_\alpha(r, \varphi)$ 为相干矩阵的迹。

3 现有光学系统偏振效应仿真结果及分析

结合 1.23 m 自适应望远镜的设计参数和检测所得的保护铝反射镜负折射率参数, 使用 Matlab 软件进行建模分析。根据望远镜系统高分辨率成像波段 700~900 nm, 仿真波长选取 800 nm。1.23 m 自

适应望远镜视场小于 $1'$, 不同视场入射光的偏振传输特性差异可以忽略, 选取 0° 视场入射光进行分析。

现有地基大口径自适应望远镜系统的偏振传输特性仿真结果如图 3 和图 4 所示, 入射光为平行望远镜主轴入射的部分偏振光, 偏振度(DoLP)在 $0 \sim 1$ 间变化, 间隔为 0.01; 偏振角在 $1^\circ \sim 180^\circ$ 间变化, 间隔 1° 。图 3(a) 为探测系统获得的目标偏振度随入射光的偏振度和偏振角变化的分布曲面, 图 3(b) 为偏振探测系统的偏振度探测偏差随入射光偏振度和偏振角变化的分布曲面。同理, 图 4(a) 和图 4(b) 分别为探测所得的探测偏振角和偏振角探测偏差。

从以上分析结果可以得知, 现有望远镜系统的偏振效应较强, 进行偏振探测时, 探测系统所得的偏振度和偏振角均存在较大偏差, 偏差分布与入射光偏振度和偏振角均有关系。且探测偏振角中存在断点, 当入射光偏振度小于 0.56 时无法进行偏振角探测, 可以认为该入射光偏振度为偏振角的探测阈值。偏振度探测偏差最大幅值为 ± 0.55 ; 阈值以上偏振角探测偏差最大值为 $\pm 41.7^\circ$, 随入射光偏振度变大而减小, 偏振度达到 1 时, 偏振角探测偏差最大值减小为 $\pm 23.3^\circ$ 。

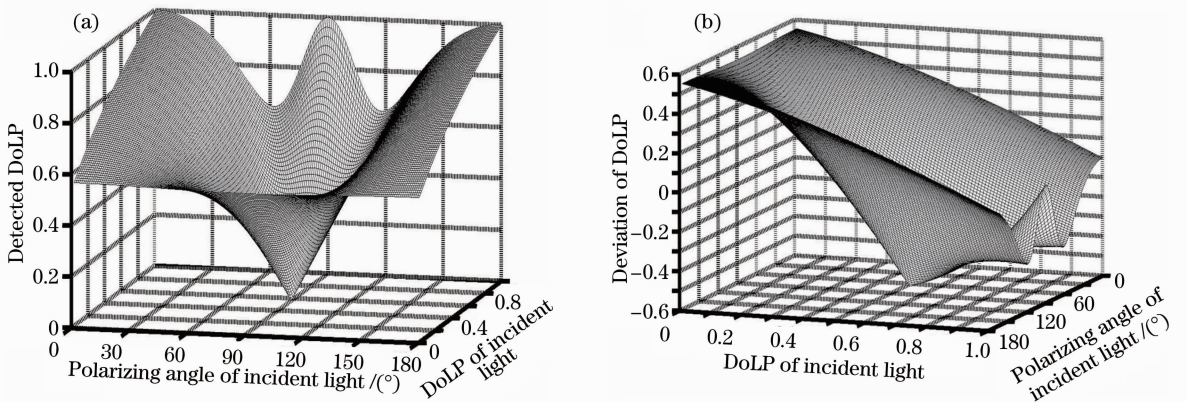


图 3 偏振度探测仿真结果。(a) 探测偏振度; (b) 偏振度探测偏差

Fig. 3 Simulation of polarizing detection. (a) Detected DoLP; (b) deviation of detected DoLP

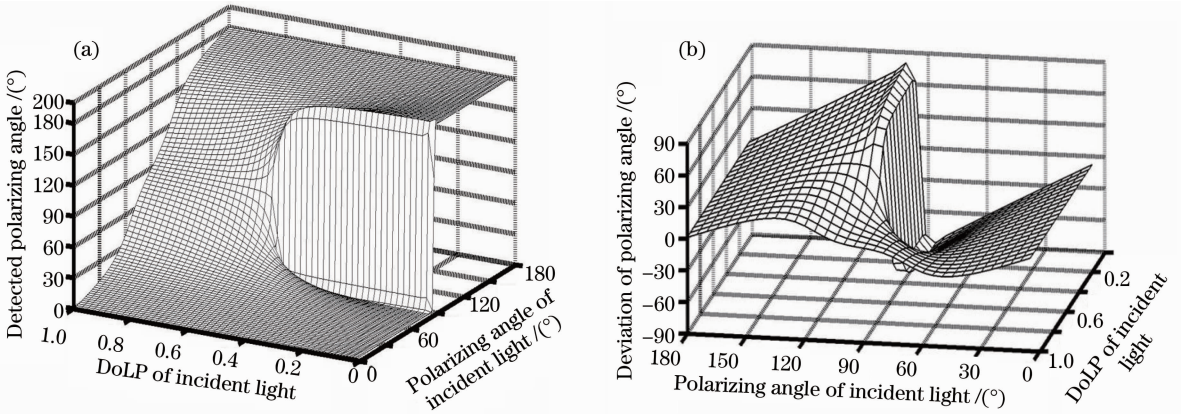


图 4 偏振角探测仿真结果。(a)探测偏振角;(b)偏振角探测偏差

Fig. 4 Simulation of polarizing detection. (a) Detected polarizing angle; (b) deviation of detected polarizing angle

结合以上仿真结果和理论分析可以得出,偏振探测偏差是由两个因素共同作用产生的:

1) 反射率因素,望远镜光学系统整体对于 P 光和 S 光的反射率不同,这导致光学系统整体有起偏作用。但产生的线偏振光与入射的线偏振光发生非相干叠加,因此会对偏振方向为 0° 和 90° 的入射线偏振光分别产生起偏和消偏作用;

2) 附加相位差因素,望远镜光学系统整体对于 P 光和 S 光的附加相位差不同,这导致光学系统整体会使入射的线偏振光部分变为椭圆偏振光,虽然不改变出射光偏振度,但由于偏振探测方式的限制,会对偏振方向为 45° 和 135° 的入射偏振光产生消偏作用。

以上两个因素影响效果的强弱和入射光偏振度有关,当目标反射的偏振光偏振度小时,非偏振光部分比例大,反射率因素主导;当目标偏振度比较大时,非偏振光比例变小,附加相位差因素主导。

4 保偏改进方案

由以上仿真结果和影响因素分析可知,1.23 m 自适应望远镜光学系统会引入较大偏振探测偏差,难以保证成像偏振探测的精度。为解决这一问题,提出了保偏改进方案,该方案包括两部分:光学系统的保偏改造和基于穆勒矩阵的斯托克斯矢量图像修正。

4.1 光学系统结构改造方案

光学系统保偏改造的目的是降低光学系统的偏振效应,从而减小偏振探测偏差。减少光学系统中反射镜的数量和用保偏效果好的介质膜反射镜替代保护铝反射镜,可以有效地减小光学系统的偏振效应。因此光学系统的保偏改造方案分为两部分:

- 1) 对自适应校正系统末端成像光路的折转结构进行改造,减少反射镜数量和反射角;
- 2) 将望远镜成像光路中的部分保护铝反射镜替换为宽带介质膜反射镜。

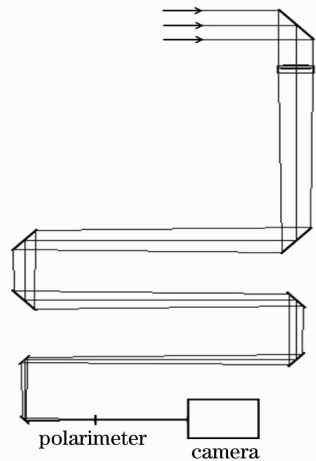


图 5 现有折转光路结构

Fig. 5 Diagram of current fold beam path

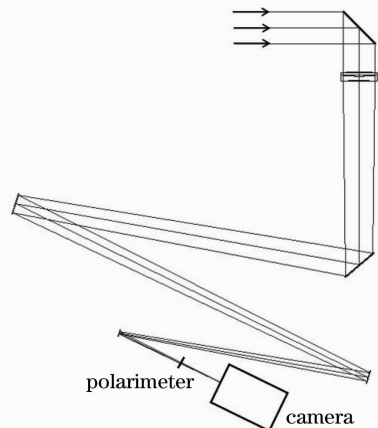


图 6 折转光路改进方案

Fig. 6 Reconstructed scheme of fold beam path

4.1.1 末端成像光路改造

图5为现有末端成像光路光学设计图,改进光学设计方案如图6所示,该方案主要是对末端平面反射镜的位置进行调整,同时减少反射镜的数量和光线入射角,基本不影响原有系统的成像质量。使用Zemax软件分析可得各视场调制传递函数(MTF)接近衍射极限,满足成像质量要求。采用建立的模型仿真计算改进后望远镜系统的偏振传输特

性,偏振度和偏振角的探测偏差如图7(a)和7(b)所示,可见偏振度探测偏差的分布未发生变化,但偏差幅度明显变小,幅值小于 ± 0.2 ;偏振角的探测阈值减小为 0.19 ,且阈值以上的最大偏振角探测偏差减小为 $\pm 35.0^\circ$,入射光偏振度达到 1 时,偏振角探测最大偏差减小为 $\pm 7.0^\circ$ 。由仿真结果可知,对末端成像光路的结构进行改造可以有效地减小光学系统的偏振效应。

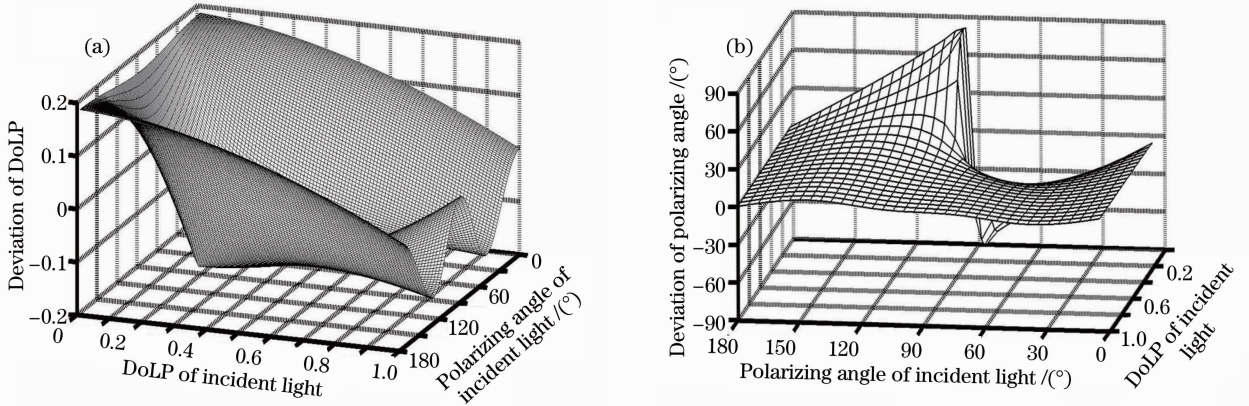


图7 光路改造后偏振探测偏差。(a)偏振度探测偏差;(b)偏振角探测偏差

Fig.7 Deviation of polarizing detection by the reconstructed scheme. (a) Deviation of detected DoLP; (b) deviation of detected polarizing angle

4.1.2 反射镜替换

对末端成像光路改进后,将现在使用的保护铝反射镜替换为保偏效果好的宽带介质膜反射镜。拟采用的介质膜反射镜为现有产品,带宽为 $350 \sim 1100 \text{ nm}$,满足 1.23 m 望远镜机上自适应系统的工作波段($500 \sim 1100 \text{ nm}$)要求;P光反射率大于 98% ,附加相位差为 π ,S光反射率大于 99% ,附加相位差为 0 ,可以进一步减小光学系统的偏振传输效应。望远镜系统中的主、次、三镜和部分专用反射

镜(变形镜等)无法进行替换,其余的反射镜均可进行替换。

通过进一步仿真分析发现,在替换时保留部分特殊位置的保护铝反射镜可以部分消除主、次、三镜带来的偏振效应,从而获得最终反射镜替换方案。该方案探测偏差如图8所示,偏振度探测偏差的分布发生了明显变化,且偏差幅值进一步减小,幅值小于 ± 0.06 。偏振角的探测阈值减小为 0.06 ,阈值以上的最大偏振角探测偏差减小为 $\pm 24.1^\circ$;入射光偏

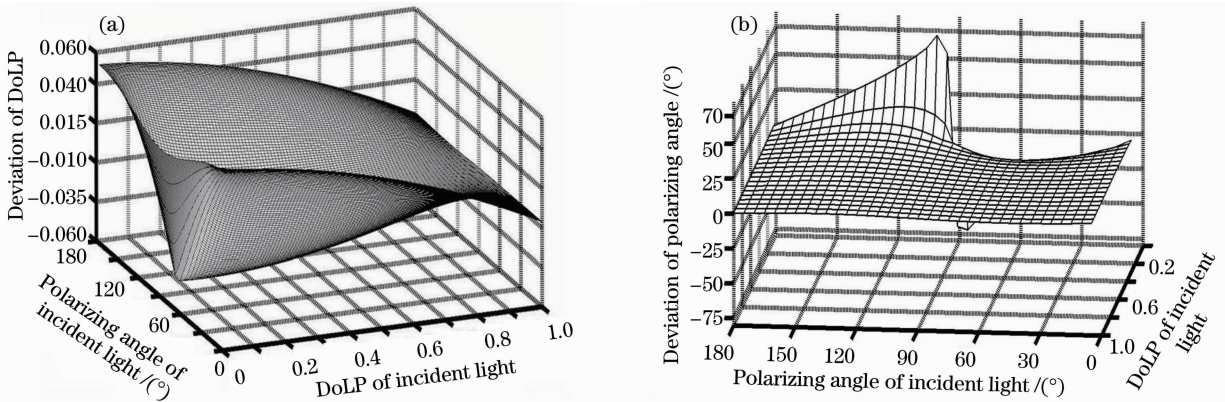


图8 反射镜替换后偏振探测偏差。(a)偏振度探测偏差;(b)偏振角探测偏差

Fig.8 Deviation of polarizing detection by the mirror replaced scheme. (a) Deviation of detected DoLP; (b) deviation of detected polarizing angle

振度大于 0.3 后, 偏振角探测最大偏差小于 $\pm 5^\circ$; 偏振度达到 1 时, 偏振角探测最大偏差减小为 $\pm 1.5^\circ$ 。由此可见进行光学系统改造虽然无法完全消除光学系统的偏振效应, 但可以明显减小成像偏振探测时的偏振探测偏差。

4.2 斯托克斯图像修正方法

拟采用的宽带介质膜反射镜带宽大, 会对保偏效果产生一定影响。为消除这部分介质膜反射镜产生的偏振效应, 根据前文分析结果, 基于穆勒矩阵给出一种斯托克斯矢量图像修正方法, 来进一步减小偏振探测偏差。

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_P + R_S}{2R_P R_S} & \frac{R_S - R_P}{2R_P R_S} & 0 & 0 \\ \frac{R_S - R_P}{2R_P R_S} & \frac{R_P + R_S}{2R_P R_S} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{R_P R_S}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中光学系统的等效反射率 R_P 和 R_S 可由光学系统结构和替换的各介质膜反射镜的检测参数综合计算得出。

4.3 保偏改进方案效果分析

在 4.1 节仿真结果的基础上, 用 4.2 节中的斯托克斯矢量修正方法进行修正, 得到偏振探测结果

对改进后的仿真结果分析可知, 对光学系统进行改进后, 宽带介质膜反射镜的 P 光和 S 光反射率差异会对偏振探测精度有一定影响。可以结合宽带介质膜反射镜的反射率参数和由折转光学系统结构获得折转光路的穆勒矩阵 \mathbf{M} 及其逆矩阵 \mathbf{M}^{-1} , 进行矩阵运算对获得的斯托克斯矢量图像进行修正, 能进一步提高偏振探测的精度。计算方法如(4)式所示, 由于空间目标散射光可以认为是只包含线偏振光的部分偏振光, 故令斯托克斯矢量第 4 个分量 S_3 和 S'_3 等于 0。

如图 9 所示, 此结果即为采用完整保偏改进方案后光学系统引入的偏振探测偏差。偏振度探测偏差的幅值减小为 ± 0.007 , 偏振角探测断点消失, 最大偏差为 $\pm 20.6^\circ$; 当入射光偏振度大于 0.04 后, 偏振角探测最大偏差小于 $\pm 5^\circ$; 偏振度达到 1 时, 偏振角探测最大偏差减小为 $\pm 0.2^\circ$ 。

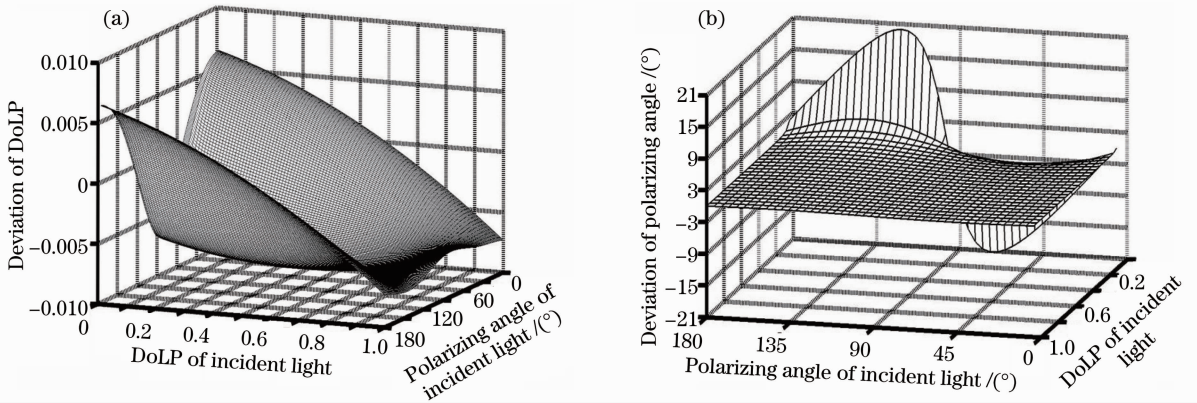


图 9 图像修正后偏振探测偏差。(a) 偏振度探测偏差; (b) 偏振角探测偏差

Fig. 9 Deviation of polarizing detection after image correction. (a) Deviation of detected DoLP; (b) deviation of detected polarizing angle

采用保偏改进后的光学系统带来的偏振探测偏差和现有系统的对比结果如表 1 所示, 主要对比参数有偏振度探测的偏差最大幅值、偏差均值和偏差标准差; 偏振角探测的阈值, 阈值以上的偏差最大幅

值、偏差均值和标准差。可见, 本文提出的保偏改进方案能明显减小光学系统的偏振效应, 大幅减小了偏振探测偏差。

表1 保偏改进前后偏振探测偏差对比

Table 1 Contrast of detected polarizing deviation between current system and improved scheme

		Current system	Improved scheme
Deviation of detected DoLP	Maximal value	± 0.55	± 0.007
	Average value	0.264	0.0047
	Standard deviation	0.157	0.0024
Threshold value (DoLP of incident light)		0.56	Null
Deviation of detected polarizing angle	Maximal value	$\pm 41.7^\circ$	$\pm 20.6^\circ$
	Average value	17.3°	0.63°
	Standard deviation	6.8°	1.7°

5 结 论

通过构建光学系统偏振特性传输模型并进行仿真,获得了1.23 m自适应望远镜系统的偏振传输特性,发现望远镜光学系统会引入较大的偏振探测偏差,会对偏振成像探测的准确性产生较大的影响。因此,基于理论分析和仿真结果得到了一种对现有光学系统可行的保偏改进方案:降低光学系统偏振效应的光学系统结构改造方案和进一步减小偏振探测偏差的斯托克斯图像修正方法。采用之前建立的仿真模型对改进后的光学系统偏振探测偏差进行分析,得到了按方案改进后望远镜光学系统引入的偏振探测偏差。

数值模拟发现改进方案可以将光学系统带来的偏振度探测偏差均值由原系统的0.264减小到0.0047;消除了偏振角探测时的阈值,且偏振角探测偏差均值从 17.3° 减小到 0.63° 。为利用现有的1.23 m自适应望远镜构建大口径偏振成像探测系统,开展针对空间目标的高分辨率偏振成像探测奠定了基础。

参 考 文 献

- R P Stead. An Investigation of Polarization Phenomena Produced by Space Objects [R]. Air Force Institute of Technology, 1967.
- D J Sancheza, S A Gregoryb, S Storm, *et al.*. Photopolarimetric measurements of geosynchronous satellites [C]. SPIE, 2001, 4490: 221-236.
- Li Yanan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, *et al.*. Spectral polarization characteristic of space target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 205-210.
李雅男,孙晓兵,毛永娜,等.空间目标光谱偏振特性[J].红外与激光工程,2012,41(1):205-210.
- Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli, *et al.*. Photopolarimetric characteristic of space target [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(7): 24-29.
李雅男,孙晓兵,乔延利,等.空间目标的光学偏振特性研究[J].光电工程,2010,37(7):24-29.
- K Bush, G Crockett, C Barnardet, *et al.*. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures; Simulation predictions using the TASAT satellite model [C]. SPIE, 2002, 4481: 46-57.

- Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin, *et al.*. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(3): 175-189.
孙晓兵,乔延利,洪津,等.可见和红外偏振遥感研究进展及相关应用综述[J].大气与环境光学学报,2010,5(3):175-189.
- Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing. Application of polarization measurement in the identification of the space targets [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(3): 200-203.
谭佐军,李俊,陈海清.偏振探测技术在空间目标识别中的应用[J].红外与激光,2007,37(3):200-203.
- Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie, *et al.*. Visualization of polarization state and its imaging method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0826002.
唐佩珺,陈飞虎,唐志列,等.偏振态的可视化及其成像技术研究[J].光学学报,2013,33(8):0826002.
- Xu Shixue. Research on the Scattered Light Polarization Characteristics Analysis for Space Target Detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011. 93-103.
徐实学.材质表面散射光偏振特性分析用于空间目标探测的研究[D].南京:南京理工大学,2011.93-103.
- Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, *et al.*. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501003.
张锐进,鲜浩,饶长辉,等.偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J].光学学报,2012,32(5):0501003.
- Gao Ming, Song Chong, Gong Lei. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213002.
高明,宋冲,巩蕾.基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面散射光偏振特性研究[J].中国激光,2013,40(12):1213002.
- Wang Yonghui, Zheng Chunlong, Zhao Zhentang. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108013.
王勇辉,郑春龙,赵振堂.基于斯托克斯椭圆偏振测量系统的多点定标法[J].中国激光,2012,39(11):1108013.
- Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.
汤飞龙,李中梁,步扬,等.一种提高偏振斯托克斯参量测量精度的方法[J].中国激光,2013,40(4):0408006.
- Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1153-1158.
宋茂新,孙斌,孙晓兵,等.航空多角度偏振辐射计的偏振标定[J].光学精密工程,2012,20(6):1153-1158.
- Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, *et al.*

- Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1915–1922.
- 侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 斯托克斯椭偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1915–1922.
- 16 Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. Polarization analysis of the cassegrain telescope used for the lidar polarization active imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1771–1774.
- 路小梅, 江月松, 饶文辉. 激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1771–1774.
- 17 Feng Weiwei, Zhang Xunli, Chen Ligang. Effect of convergent light on polarization measurement [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(4): 559–565.
- 冯伟伟, 张循利, 陈立刚. 光束会聚对光学偏振探测影响的分析[J]. *激光技术*, 2011, 35(4): 559–565.
- 18 R Azzam, N Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Liang Minji Transl. Beijing: Science Press, 1986. 92–99.
- 阿查姆, 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 梁民基译. 北京: 科学出版社, 1986. 92–99.
- 19 Li Juan, Yi Weining, Huang Honglian, *et al.*. Accuracy detection for polarization imaging system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 215–219.
- 李娟, 易维宁, 黄红莲, 等. 一种偏振成像探测系统的测量精度检测[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 215–219.

栏目编辑: 苏 岑