

多角度偏振辐射计望远系统的新设计

宋茂新 孙亮 孙晓兵 洪津

中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心, 安徽 合肥 230031

摘要 为解决多角度偏振辐射计分孔径偏振测量的视场统一问题,并保证偏振测量精度。提出基于反射式望远系统的分孔径光路,并对选定的两镜扩束系统方案进行了初始结构参数的计算及系统优化。对反射镜镀银膜的新望远系统与透镜镀 $\lambda/4$ 波长氟化镁的原望远系统的偏振效应进行了模拟分析,望远系统偏振效应的模拟结果表明:基于银膜反射镜的新望远系统在波长最短的410 nm的偏振效应最大为0.258%,其他波段均低于0.1%,优于或与原系统相当。新望远系统能保证各波段视场统一并满足低偏振效应的条件,可替代原透射望远系统,并提出一种基于新望远系统的偏振探测方案。对新探测方案的优势进行了总结,指出了缺陷及应对措施,并对应用进行了分析。

关键词 光学设计;偏振;望远系统;分孔径;银反射镜;多角度

中图分类号 O439

文献标识码 B

doi: 10.3788/LOP52.070801

New Design of Telescope System for Multi-Angle Polarimetric Radiometer

Song Maoxin Sun Liang Sun Xiaobing Hong Jin

Center for Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to solve the field unification problem of aperture division of multi-angle polarimetric radiometer, and ensure the polarization measurement accuracy. A division of aperture optical path base on reflective telescope is proposed, then select two mirror beam expander program, calculate the initial structure parameters and optimize the system. The polarization effect of the new telescope system with silver mirror and the original telescope system with lens coated with $\lambda/4$ MgF₂ are simulated and analyzed. The simulation results show that the new telescope system with silver film mirror has 0.258% of the maximum polarization effect at a shortest wavelength of 410 nm, lower than 0.1% at the other bands. It is better than the original system, or quite. The new telescope system can ensure the unity of the field of view of all bands and meet the condition of low polarization effect, and can replace the original transmission telescope system, and a polarization detection method based on the new telescope system is proposed. Finally, the advantages of the new detection method are summarized, and the flaws and countermeasures are pointed out, the application is also analyzed.

Key words optical design; polarization; telescope system; division aperture; silver mirror; multi-angle

OCIS codes 080.4035; 120.1680; 120.5410; 120.5630

1 引言

偏振、光强、波长与相位是光学测量的四个基本物理量,不同的物理量代表了不同的信息类型,并反映目标物理化学特性的不同方面。由于偏振能提供与光谱光强不相关的特性信息,因此偏振仪器被作为强力的工具应用于不同研究领域。特别在大气遥感领域,偏振测量被公认为气溶胶粒子特性描述的关键技术。事实上,偏振信息用于气溶胶探测需要将偏振信息作为角度及光谱的函数进行探测,即需要将散射光的偏振、多光谱及多角度信息联合,才能确切获得气溶胶的光学厚度及微物理特性(如尺寸分布,化学组分,粒子形状)。气溶胶特性测量不仅在评估气溶胶对人类健康危害有重要意义,更是获取气溶胶散射吸收特性的关键,而该特性是目前气候模拟的最大不确定性来源。

收稿日期: 2015-03-03; 收到修改稿日期: 2015-03-06; 网络出版日期: 2015-05-20

基金项目: 国家973计划、中国科学院重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 宋茂新(1983—),男,博士,副研究员,主要从事偏振遥感技术方面的研究。E-mail: smx0369@163.com

因此除了地基偏振测量仪器,各种机载/星载偏振仪器被发展用于大范围乃至全球范围的气溶胶探测。POLDER^[1]是最早的星载偏振遥感仪器,本质上是一台鱼眼相机,通过旋转探测器前的滤光片/偏振片轮流分时完成多光谱及偏振测量,结合平台移动实现对同一目标的多角度观测,其偏振精度约为2%,时序效应是其虚假偏振的主要来源。多角度光谱偏振成像仪(MSPI)^[2]有机载与星载两个版本,其利用夹在两片1/4波片之间的双光弹调制器形成高速调制信号,结合贴在探测器前的微偏振片/滤光片获取偏振及多光谱信息,多角度信息需要将该系统复制或扫描,其偏振精度约为0.5%。SPEX^[3]利用两块延迟器加偏振片组成的调制模块提供随波长变化的正余弦载波,并被目标的偏振参量调制,在光谱的频域进行滤波及傅立叶逆变换可得到光谱偏振信息,多角度信息也需要将系统复制或扫描,该系统的实验室偏振精度可达0.2%。机载研究型扫描偏光计(RSP)^[4]与星载气溶胶偏振传感器(APS)^[5]采用了严格的的同时偏振测量方法,通过在六路望远系统后放置渥拉斯顿棱镜及分色片实现偏振及多光谱的测量,多角度信息依靠旋转望远系统前的正交反射镜组扫描获取,偏振精度约为0.2%。

多角度偏振辐射计^[6-7]是设计用于机载平台进行大气气溶胶探测的偏振仪器,采用了RSP/APS的探测原理,并借鉴了其光路结构。由于采用了透射式望远系统,大量透镜的使用,一方面增加了引入差异效应的因素,如各谱段的视场差异,透射率差异,安装应力差异等,从而影响测量精度进而对加工安装精度提出苛刻要求。另一方面受材料及色差的影响,限制了探测的光谱范围及谱段数量。针对上述问题,本文探讨了一种新的望远系统,并提出一种新的偏振探测方案。

2 原光学系统介绍

多角度偏振辐射计原光学系统的原理如图1所示,正交反射镜组第一片反射镜被省略,系统共有三对光路只示意了一对。三对光路间的区别在于探测的波长不同,成对光路间的渥拉斯顿棱镜方位分别为 0° , 45° ,而每块棱镜可将入射光分解为振动方向互相垂直的两束线偏振光,因此,成对光路可分解出振动方向为 $0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$ 共四束线偏振光,分别被聚焦透镜聚焦于两个二元探测器上。各波段全视场为 1° ,口径为12 mm,波段设计范围覆盖410~2250 nm。

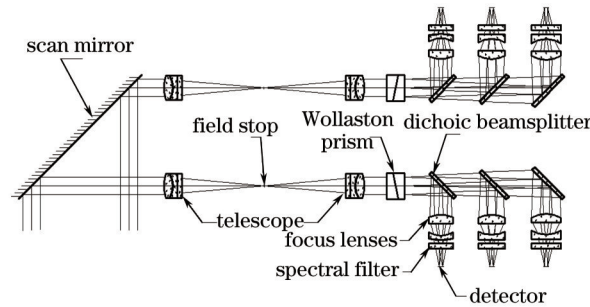


图1 多角度偏振辐射计的原光学系统图

Fig.1 Original optical system diagram of the multi-angle polarimetric radiometer

不考虑圆偏振分量,入射光的偏振信息可用斯托克斯矢量的前三个分量表示,记作 $[S_0 \ S_1 \ S_2]^T$,设探测器对四束线偏振光的响应记作 $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$,理论条件下根据Pickering's method^[8](1)式可求得入射光偏振信息:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_0 + I_{90} + I_{45} + I_{-45})/2 \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

需说明的是,分孔径望远系统的作用是为所有波段提供大小相同,方向一致的重合视场。由于渥拉斯顿棱镜前光学元件对信号偏振态的任何改变,都会影响系统的偏振测量精度,而正交反射镜组由于相互补偿可忽略其偏振效应,所以望远系统的偏振效应是系统残余偏振的主要来源。系统分为六平行光路是为了使孔径的排布紧凑,达到最高的反射镜及空间利用率。每条光路分色成三个波段是由于单条望远系统最多在三个波段严格校正倍率色差,从而保证视场大小相同。图1中成对光路的平行间距主要受最后一面反射片的安装排布空间限制。

3 新望远系统的设计

3.1 新望远系统的设计及性能分析

基于原系统分孔径的测量方案,考虑将望远系统由透射系统改为两镜无焦系统。两镜系统的基本结构如图2所示,首先接受入射光的为主镜,主次镜均为二次曲面,表达式为 $y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2$, 其中 e 为偏心率, R 为顶点曲率半径。

假设目标位于无穷远且光阑位于主镜,则 $l_1 = \infty$, $u_1 = 0$, $x_1 = y_1 = 0$ 。定义次镜的遮拦比 $\alpha = \frac{l_2}{f_1'} = \frac{2l_2}{R_1} \approx \frac{h_2}{h_1}$, 次镜的放大倍数 $\beta = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2'}{u_2}$ 。

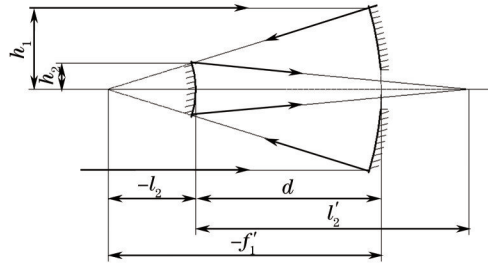


图2 两镜系统基本结构

Fig.2 Basic structure of two-mirror system

根据三级像差理论,将五种单色像差分别置零得面型参数表达式^[9]为

$$S_I=0: e_2^2 = \frac{(e_1^2 - 1)\beta^3 + \alpha(1 - \beta)^2(1 + \beta)}{\alpha(1 + \beta)^3}, \quad (2)$$

$$S_{II}=0: e_2^2 = \frac{2\beta + (1 - \alpha)(1 - \beta)^2(1 + \beta)}{(1 - \alpha)(1 + \beta)^3}, \quad (3)$$

$$S_{III}=0: e_2^2 = \frac{4\beta(1 - \alpha + \beta) + (1 - \alpha)^2(1 - \beta)^2(1 + \beta)}{(1 - \alpha)^2(1 + \beta)^3}, \quad (4)$$

$$S_{IV}=0: \alpha = \frac{\beta + 1}{\beta}, \quad (5)$$

$$S_V=0: e_2^2 = \frac{2\beta(3 - 3\alpha + \beta + 3\alpha\beta) + (1 - \alpha)^2(1 - \beta)^2}{(1 - \alpha)^2(1 + \beta)^2}. \quad (6)$$

当出射光束为平行光时,即次镜放大倍数 $\beta = \pm\infty$, 分别代入(2)~(6)式得

$$S_I=0: e_2^2 = \frac{(e_1^2 - 1) + \alpha}{\alpha}, \quad (7)$$

$$S_{II}=0: e_2^2 = 1, \quad (8)$$

$$S_{III}=0: e_2^2 = 1, \quad (9)$$

$$S_{IV}=0: \alpha = 1, \quad (10)$$

$$S_V=0: e_2^2 = \frac{2 + 6\alpha + (1 - \alpha)^2}{(1 - \alpha)^2}. \quad (11)$$

根据(7)~(11)式可知,当 $S_I=S_{II}=S_{III}=0$, 得 $e_1^2 = e_2^2 = 1$ 。当增加 $S_{IV}=0$, 需满足遮拦比 $\alpha = 1$; 当增加 $S_V=0$, 需满足遮拦比 $\alpha = -1/3$ 。即不考虑场曲与畸变,由两抛物面镜能得到任意遮拦比的无焦系统。 $\alpha > 0$ 与 $\alpha < 0$ 对应的无焦系统结构如图3所示。

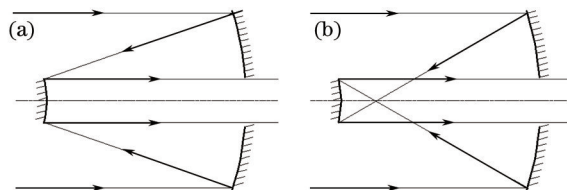


图3 两种无焦系统。(a) $\alpha > 0$; (b) $\alpha < 0$

Fig.3 Two afocal system. (a) $\alpha > 0$; (b) $\alpha < 0$

实际系统为兼顾像差与结构尺寸,将遮拦比设为 -0.5 ,假设主次镜间距为 150 mm ,容易求得主次镜初始曲率半径分别为 50 mm 和 100 mm ,输入光学软件简单优化即可获得满意结果,如图4所示。新望远镜系统的视场,波段及口径与原系统相同。

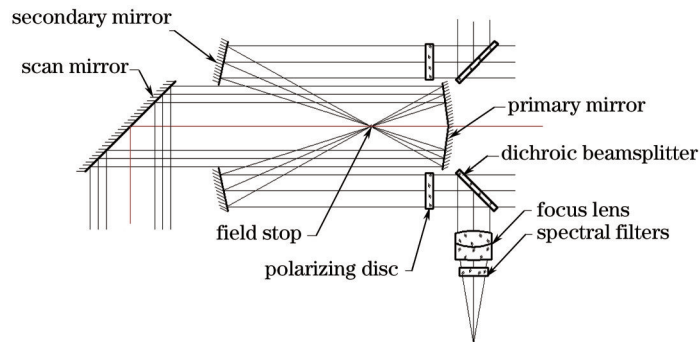


图4 新望远镜系统的光学系统图

Fig.4 Optical system diagram with new telescope system

3.2 新望远镜系统的偏振特性

望远系统的偏振效应是影响仪器偏振测量精度的关键因素,这里以对非偏振光偏振态的改变进行评价。根据菲涅耳公式^[10],针对特定波段和视场,利用光学软件在入瞳选取多条光线并追迹,得到每条光线的偏振态,最后取多条光线的平均值。

假设新望远镜系统主次镜反射膜层均为银膜,银膜的复折射率^[11]见表1,未镀保护层,计算结果见表2。各波段不同视场光线对主次镜的入射/出射角几乎相等,所以偏振效应相同。

表1 银的复折射率参数

Table 1 Silver complex refractive index parameters

Wavelength /nm	400	450	500	550	600	700	800	900	1000	2000
Real part	0.075	0.055	0.05	0.055	0.06	0.075	0.09	0.105	0.129	0.48
Imaginary part	1.93	2.42	2.87	3.32	3.75	4.62	5.45	6.22	6.83	14.4

表2 新望远镜系统的偏振效应

Table 2 Polarization effects of new telescope system

Wavelength /nm	Field of view /($^{\circ}$)	S_0	S_1	S_2	S_3	Degree of polarization
410	0	0.89683	0.00231	0.00000	0.00000	0.00258
410	0.5	0.89683	0.00231	0.00000	0.00000	0.00258
410	-0.5	0.89683	0.00232	0.00000	0.00000	0.00259
490	0.5	0.95531	0.00095	0.00000	0.00000	0.00099
550	0.5	0.96407	0.00074	0.00000	0.00000	0.00077
670	0.5	0.97238	0.00055	0.00000	0.00000	0.00057
865	0.5	0.97862	0.00042	0.00000	0.00000	0.00043
960	0.5	0.97883	0.00041	0.00000	0.00000	0.00042
1380	0.5	0.98572	0.00028	0.00000	0.00000	0.00028
1640	0.5	0.98636	0.00026	0.00000	0.00000	0.00027
2250	0.5	0.97753	0.00043	0.00000	0.00000	0.00044

为与原光路比对,假设原光路所有透镜均镀 $1/4$ 中心波长的氟化镁膜^[12],忽略安装应力引入的延迟效应。只将原光路一个通道的三个波段结果列出,见表3。

从以上模拟结果来看,在不失一般性的假设条件下,新望远镜系统的偏振效应与原系统相当,满足高精度偏振探测的要求,但系统透射(反射)率比原系统明显占优,因此新望远镜系统可替代原光路。

表3 原望远系统的偏振效应

Table 3 Polarization effects of original telescope system

Wavelength /nm	Field of view /(°)	S_0	S_1	S_2	S_3	Degree of polarization
410	0	0.79498	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.5	0.79445	-0.00125	0.00000	0.00000	0.00158
	-0.5	0.79445	-0.00125	0.00000	0.00000	0.00158
550	0	0.94373	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.5	0.94372	-0.00073	0.00000	0.00000	0.00077
	-0.5	0.94372	-0.00073	0.00000	0.00000	0.00077
865	0	0.75857	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.5	0.75875	-0.00174	0.00000	0.00000	0.00229
	-0.5	0.75875	-0.00174	0.00000	0.00000	0.00229

3.3 一种新探测方案

基于新的望远系统,考虑到扩束后偏振器件口径的增大,将渥拉斯顿棱镜替换为偏振片,如图4所示,每三条光路形成一组,一组光路的三个偏振片的方位角分别为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$,设探测器对三个方向的线偏振的响应记作 I_0, I_{60}, I_{120} ,理想条件下入射光偏振信息可根据Fessenkov's method^[8]公式求得。光路条数即分孔径的数量根据探测波段及空间需求而定:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} I_0 + I_{60} + I_{120} \\ I_0 - I_{60} - I_{120} \\ \sqrt{3} \cdot (I_{120} - I_{60}) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

4 结 论

4.1 新探测方案的优势

1) 采用的反射望远系统无色差,所有通道的视场大小一致,瞄准方向一致,避免了光阑尺寸一致性要求及光轴瞄准方向的装调。

2) 六光路的孔径在主镜处的排布更紧凑,缩小了正交反射镜口径,对提高系统的可靠性及降低功耗有重要意义,同时为次镜后的分色/反射片安装提供了充足空间。

3) 减少了光学元件数量及透镜材料种类,降低了系统的加工装调公差要求,节约了系统成本,对通道间的差异性控制有重要意义。

4) 各通道的分色波段数量只受偏振分析器件带宽及分色片光谱特性限制,探测波段范围更宽数量更多。

5) 采用新探测方案避免了渥拉斯顿棱镜及二元探测器的使用,降低系统的温度敏感性,避免了复杂的双元探测器装调。

4.2 新探测方案的劣势及应对措施

1) 新探测方案的望远系统为扩束系统,次镜后元器件的孔径要增加,通过将主次镜分别半口径使用,可使扩束比等于或小于1。

2) 由于孔径的离轴使用,各孔径的视场会存在一定的渐晕差异,与离轴量呈正相关,但该差异很小,在可接受范围。

3) 新系统的主次反射镜会引入一定的残余偏振,并随光线在主次镜入射/出射角的增大而增加,可通过降低主次镜顶点曲率即增大两镜间距,调整扩束比以及优化反射镜膜层等措施进一步降低。

4) 新系统需三条光路进行偏振测量,相对原系统在一定程度上增加了系统的差异因素,可通过控制元器件的工艺一致性或定标来解决。

4.3 新探测方案的应用分析

基于反射望远系统的分孔径同时偏振探测方案,适于对远距离快速变化目标的高精度偏振测量。由于系统具有前置扫描单元,结合探测平台的移动,沿平台移动方向扫描能够获取目标的多角度信息,垂直平台移动方向扫描能获取几何成像信息。单元探测器的采用一方面极大拓宽了系统的探测谱段,从而获取宽谱

段范围的多光谱信息,另一方面有利于保证系统响应的动态范围。此外系统还具有结构紧凑,温度敏感性低等特点。因此,新探测方案特别适用于空基或天基平台对大气气溶胶的探测^[13-14]。

参考文献

- 1 Deschamps P Y, Bréon F M, Leroy M, *et al.*. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives[J]. *Geoscience Remote Sensing, IEEE Transactions*, 1994, 32(3): 598-615.
- 2 Diner D J, Davis A, Hancock B, *et al.*. First results from a dual photoelastic-modulator-based polarimetric camera[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(15): 2929-2946.
- 3 Van Harten G, Snik F, Rietjens J H H, *et al.*. Prototyping for the spectropolarimeter for planetary exploration (SPEX): calibration and sky measurements[C]. *SPIE*, 2011, 8160: 81600Z.
- 4 Cairns B, Russell E E, La Veigne J D, *et al.*. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols[C]. *SPIE*, 2003, 5158: 33-44.
- 5 Peralta R J, Nardell C, Cairns B, *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the Glory mission[C]. *SPIE*, 2007, 6786: 67865L.
- 6 Song Maoxin, Sun Bing, Sun Xiaobing, *et al.*. Polarization calibration of aviation multi-angle polarizing 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定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1153-1158.
- 7 Yang Weifeng, Song Maoxin, Hong Jin. Opto-mechanical design of multi-angle polarimeter[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 232-238.
杨伟锋, 宋茂新, 洪 津. 多角度偏振辐射计的光机设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 232-238.
- 8 Schott J R. *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing*[M]. *SPIE Press*, 2009: 33-63.
- 9 Pan Junhua. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 10-31.
潘君骅. *光学非球面的设计、加工与检验*[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10-31.
- 10 Liao Yanbiao. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 19-40.
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 19-40.
- 11 Wakaki M, Shibuya T, Kudo K. *Physical Properties and Data of Optical Materials*[M]. *CRC Press*, 2010: 353.
- 12 Qiu Zhenwei, Hong Jin, Li Shuang, *et al.*. Methods to simultaneously achieve radiometric and polarimetric accuracy for multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828003.
裘桢炜, 洪 津, 李 双, 等. 多通道超广角偏振相机辐射精度和偏振精度的同时实现方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0828003.
- 13 Wang Han, Sun Xiaobing, Sun Bin, *et al.*. Evaluation of land surface polarization models band on airborne advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0128002.
王 涵, 孙晓兵, 孙 斌, 等. 基于航空多角度偏振辐射计遥感数据评估陆地表面偏振反射模型[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0128002.
- 14 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.*. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.
王 威, 褚金奎, 崔 岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.

栏目编辑: 何卓铭