

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

裘桢炜^{1,2} 洪津^{1,2} 李双^{1,2} 孙亮^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230021
² 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230021)

摘要 多通道超广角偏振相机可以获得目标的多光谱、多角度和偏振辐射信息,是星载偏振遥感器的优秀方案。通过对采用该方案的多角度偏振成像仪光学系统的分析,指出其超广角镜头的偏振特性的不同部分(线性双向衰减和线性相位延迟)对非偏通道辐射精度和偏振通道偏振精度有不同的影响,导致两种精度要求无法同时满足。在仪器原有方案的基础上,提出综合镜头改进设计、镜头膜系设计和定标模型的方法来满足不同精度要求。改进方案相对原方案能有效地减小超广角镜头对仪器两种精度的影响,可以为类似的多通道超广角偏振相机的精度设计提供参考。

关键词 遥感;偏振仪;偏振成像;偏振精度;辐射精度

中图分类号 TP732 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0828003

Methods to Simultaneously Achieve Radiometric and Polarimetric Accuracy for Multichannel Ultra-Wide-Angle Polarimetric Camera

Qiu Zhenwei^{1,2} Hong Jin^{1,2} Li Shuang^{1,2} Sun Liang^{1,2}

(¹ *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230021, China*
² *Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230021, China*)

Abstract Multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera is a fine solution for polarimetric remote sensing by achieving multispectral, multiangle, and polarimetric information in target detection. By analyzing the optical system of Directional Polarimetric Camera, which belongs to this type, it is shown that the different aspects of the polarization properties of ultra-wide-angle lens (linear diattenuation and retardance) bring different effects on radiometric and polarimetric accuracies so that they can hardly be satisfied simultaneously. Based on the original design of Directional Polarimetric Camera, a method, which includes improved lens design, better optical coating design and modified polarimetric calibration is developed, to satisfy the accuracy specifications. After comparison between these two designs, the result shows that the improved method reduces the above so-called difference effectively. The method can work as a reference for accuracy design of other multichannel ultra-wide-angle polarimetric cameras.

Key words remote sensing; polarimetry; polarimetric imaging; polarimetric accuracy; radiometric accuracy

OCIS codes 280.0280; 120.5410; 110.5405

1 引言

偏振遥感信息包含大量与传统遥感中光谱、强度信息相独立的内容,可以提高气溶胶、云等大气成

分遥感的精度,已成为大气光学遥感发展的一个新方向^[1-4]。目前,法国的 POLDER,美国的 RSP、APS、MSPI 等机载或星载偏振遥感仪器已经取得

收稿日期: 2013-03-11; 收到修改稿日期: 2013-04-21

基金项目: 中国科学院重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 裘桢炜(1982—),男,博士研究生,主要从事偏振遥感仪器方面的研究。E-mail: zwqiu@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪津(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱偏振遥感技术和航空航天遥感工程技术等方面的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

了一定的成功。国内也正在发展诸如多角度偏振成像仪、多角度偏振辐射计^[5]和强度调制偏振光谱仪^[6]等偏振仪器。其中 POLDER^[7]采用多光谱通道、超广角镜头的偏振相机方案,采样幅宽广、获取信息量大、结构紧凑可靠,是优秀的星载偏振遥感器方案。然而,该方案采用的超广角镜头具有不可避免的偏振特性,并且在边缘大视场处尤为显著。而镜头的偏振特性(主要包括双向衰减和相位延迟)会影响辐射测量精度和偏振测量精度,但对两种精度的影响并不一致^[8]。在仪器精度要求不断提高的背景下,这种不一致性将导致两种精度要求无法同时满足。目前对此不一致性的研究以及相关改进方法尚未见诸报道。

本文以采用该方案的多角度偏振成像仪为例,介绍其光学系统,并分析了镜头偏振特性对辐射精度和偏振精度的不同影响,指出这种情况产生的原因;提出了综合镜头改进设计、镜头膜系设计和模型定标的方法,使非偏通道的辐射精度和偏振通道的偏振精度同时满足高精度测量要求。

2 多角度偏振成像仪简介

2.1 多角度偏振成像仪系统介绍

实验中所用的多角度偏振成像仪(DPC)由民用航天预研项目支持中国科学院安徽光学精密机械研究所研制。DPC有一个包含非球面透镜的超广角镜头,通过安装在转轮上的偏振片和滤光片来分离光谱和偏振通道,用电荷耦合器件(CCD)探测器成像。成像仪包含490、670、865 nm三个经典偏振通道,443~910 nm中选取的5个非偏振通道。DPC的光学布局图如图1所示。

DPC的镜头采用像方远心系统,前组透镜和后组透镜之间是光阑,焦面前设置偏振片-滤光片轮,

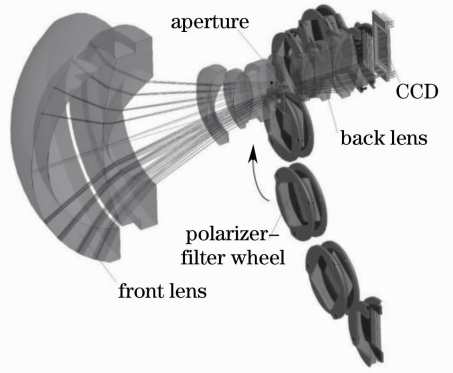


图1 多角度偏振成像仪的光学布局

分时获取光谱和偏振的多角度信息。为了能够实现精确多角度观测,应严格要求光学镜头的畸变控制。

偏振片-滤光片轮依次放置有偏振轴为 0° 、 60° 、 120° 的偏振片,得到上述三个角度的数据后,可以通过偏振解调得到目标的线偏振度和偏振角等参数。由于自然目标的圆偏振分量非常小,DPC不考虑圆偏振分量。DPC的辐射测量精度为5%,其中分配到仪器本身的测量精度不大于4%;偏振测量精度为2%。初版样机的定标过程中发现,无论采用何种定标方式,辐射测量精度和偏振测量精度始终无法同时满足要求。

2.2 偏振通道偏振精度与非偏通道辐射精度的矛盾

根据DPC的光学布局图,可以看到偏振通道和非偏通道共用一个镜头,这也是常见的多通道仪器布局方式。在一般成像仪器中,镜头的偏振特性往往被忽略,这在精度要求不高的前提下是合理的。但若采用超广角镜头,入射光在每一个透镜表面上的入射角难以控制在近轴小角度范围内,根据菲涅耳定律,镜头会有较显著的偏振特性。由于镜头采用的是各向同性材料,镜头的偏振特性主要由(线性)双向衰减和(线性)相位延迟组成。镜头第*i*界面的Mueller矩阵有以下形式^[9]:

$$M_i = T_i \begin{bmatrix} 1 + D_i & -\cos(2\psi_i) & 0 & 0 \\ -\cos(2\psi_i) & 1 + D_i - 2D_{v,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin(2\psi_i)\cos\theta_i & \sin(2\psi_i)\sin\theta_i \\ 0 & 0 & -\sin(2\psi_i)\sin\theta_i & \sin(2\psi_i)\cos\theta_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 T_i 是透射率修正因子; D_i 是退偏系数; $D_{v,i}$ 是交叉退偏系数; ψ_i 、 θ_i 是椭圆偏振系数,其中, ψ_i 描述双向衰减的影响, θ_i 描述相位延迟。

退偏效应由光学系统中的非均匀性、污染颗粒、

缺陷等因素引起,影响仪器的偏振测量精度。在良好的材料选择、加工、装配环境等前提下,通常镜头的退偏效应可以忽略,即 $D_i = D_{v,i} = 0$ 。若镜头由*n*个界面组成,总的Mueller矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{lens}} = \mathbf{M}_n \mathbf{M}_{n-1}, \dots, \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\sum_{i=1}^n \cos(2\psi_i) & 0 & 0 \\ -\sum_{i=1}^n \cos(2\psi_i) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \prod_{i=1}^n \sin(2\psi_i) & \left[\prod_{i=1}^n \sin(2\psi_i) \right] \sum_{i=1}^n \theta_i \\ 0 & 0 & \left[\prod_{i=1}^n \sin(2\psi_i) \right] \sum_{i=1}^n \theta_i & \prod_{i=1}^n \sin(2\psi_i) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中考虑了镜头光学表面的双向衰减和相位延迟均为小量。

入射斯托克斯矢量经过镜头后有：

$$\begin{bmatrix} I_{\text{out}} \\ Q_{\text{out}} \\ U_{\text{out}} \\ V_{\text{out}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{lens}} \begin{bmatrix} I_{\text{in}} \\ Q_{\text{in}} \\ U_{\text{in}} \\ V_{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 I 、 Q 、 U 、 V 是斯托克斯矢量，下标代表入射和出射的光束。

综合(2)、(3)式，可知辐射测量仅受双向衰减影响；而偏振测量受双向衰减和相位延迟的共同影响。显然如果将双向衰减和相位延迟减小至 0，那么偏振通道和非偏通道都可以获得最佳性能。然而相位延迟在未镀膜的时候等于 0，此时双向衰减较大；在镀多层减反射膜后双向衰减可以抑制至低水平，相位延迟则较大，两者存在矛盾。受制于应用、材料和工艺，除中心视场外，双向衰减和相位延迟不可能同时等于 0。在实际设计中只能有所侧重。

综上所述，多角度偏振成像仪的偏振通道偏振精度和非偏通道辐射精度的实现是存在矛盾的。其矛盾的主要原因是超广角镜头带来的偏振特性。

3 同时实现偏振通道偏振精度与非偏通道辐射精度的方法

为同时实现高偏振精度和高辐射精度，提出解决方法如下：尽可能的降低未镀膜镜头的偏振特性；设计镜头减反射膜系时在尽量降低偏振特性的同时，考虑侧重于双向衰减还是相位延迟；选择相关的定标方法。

3.1 低偏振效应镜头设计

未镀膜镜头的低偏设计是后续膜系设计的基础。良好的低偏振效应镜头设计可以大大降低膜系设计的压力。另一方面，低偏镜头可以减少定标时

的非线性效应，因而也需要首先进行低偏镜头设计。

低偏振效应镜头设计的关键在于使得入射光在每一个光学界面上保持低入射角入射^[10]。这可以在光学设计软件中添加相应的限制参数并优化实现。这里采用将一片透镜分成两片的方法来降低入射角。为此增加界面后的偏振特性是否小于单个界面的偏振特性、界面增加导致的透射率的下降以及加工成本上升等因素也要加以权衡。

DPC 的光学镜头设计相当复杂，需要兼顾成像质量与调制传递函数(MTF)、畸变、非球面加工限制、像面照度均匀性和大视场等因素。在满足这些因素的前提下，控制透镜界面上的入射角十分困难。在增加一片透镜，并部分修改玻璃材料后，优化得到新的镜头设计方案。前后镜头设计方案的各界面入射角对比如图 2 所示。

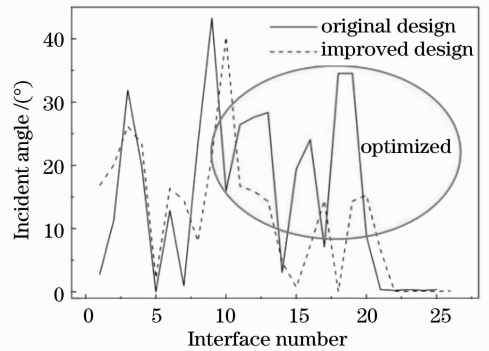


图 2 原版和改版后的入射角

Fig. 2 Incident angle of original and improved design

图 2 中计算的入射角均是以最大视场时孔径中心主光束来计算的。可以看到，改进后的设计主要在后组镜头处较大幅度的降低了入射角。在前组镜头处虽然也有所优化，但在第 10 个面入射角有一个峰值，原版光学系统的入射角为 43° ，改进后稍有降低，为 40.3° 。根据镜头的像差分析，此处是畸变校正的关键界面，难以进一步降低界面的入射角。正因为如

此,单纯的依靠光学镜头设计来降低镜头偏振特性无法满足高精度测量要求,需要进一步从膜系设计上加以改进。

3.2 膜系设计改进

在镜头设计完成后,膜系设计尤其是减反射膜系的设计很大程度上影响镜头整体的偏振特性。不镀膜镜头虽然能实现零相位延迟,但是实际应用中,类似于 DPC 的镀膜面多于 20 个的光学镜头,其在不镀膜的情况下镜头透射率仅为 20% 甚至更低。因而,镜头减反射膜系的设计前提是保持高透射率。

DPC 初版样机采用的膜系是普通宽带减反射膜,根据基底材料折射率是否大于 1.65 而分成两种,减反射区域内平均反射率小于 1.5%。图 3 是以熔石英 F_silica 基底和火石玻璃 ZF13 基底为例,利用 UV2550 型分光光度计测得的反射率曲线。

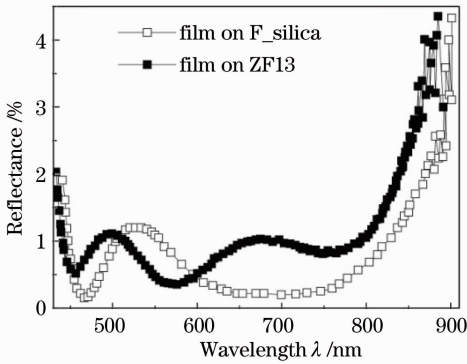


图 3 两种减反射膜的反射率曲线

Fig. 3 Measured reflectance curves of two anti-reflection coatings

宽带减反射膜剩余反射率越高,其双向衰减相对越大^[11]。因此,改进减反射膜系的设计需要先尽量提高高透射率和降低双向衰减,在这基础上进一步控制膜系的相位延迟。

图 4 是双向衰减和相位延迟随着减反射膜层数增加的变化趋势图,入射光以 40° 入射,基底材料为 BK7 玻璃,减反射波段为 400~900 nm。双向衰减和相位延迟均取波段范围内的平均值。0 层为未镀膜,1 层为单层 MgF₂, 3~20 层均为常规减反射膜。由图 4 中可知,虽然因为膜系设计多样化的原因,曲线并不符合严格的函数关系,但是双向衰减和相位延迟变化的相反趋势是明确的。对于工作在此波段,偏振要求相对不高的系统,8 层膜系同时具有较小的双向衰减和相位延迟,是较优的设计选择。但若需要达到极低的双向衰减,只能以大相位延迟作为代价。

对于 DPC 的光谱带宽 $B=(940 \text{ nm})/(430 \text{ nm}) \approx$

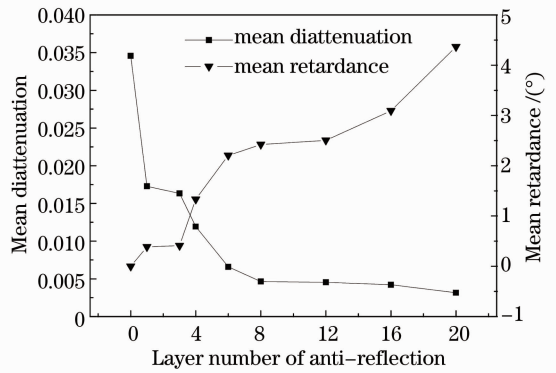


图 4 随着减反射膜层数增加变化的平均双向衰减和相位延迟

Fig. 4 Mean diattenuation and retardance with layers of anti-reflection coatings increasing

2.2] 的膜系来说,层数为 8~10 层较为合适^[12],这和上面的分析也是一致的。基底材料为 F_silica,层数为 8 层,采用二层周期结构 TiO₂ (H) 和 SiO₂ (L) 构建膜系,顶层膜系则采用 MgF₂ (F); 初始结构选取为 (0.2H0.2L)²1.5H0.2L0.2HF; 设定优化参数为 20° 的双向衰减和 0°~20° 的反射率均为 0,优化可得到减反射膜系,膜系结构与其 S 光、P 光和平均反射率曲线如图 5 所示。

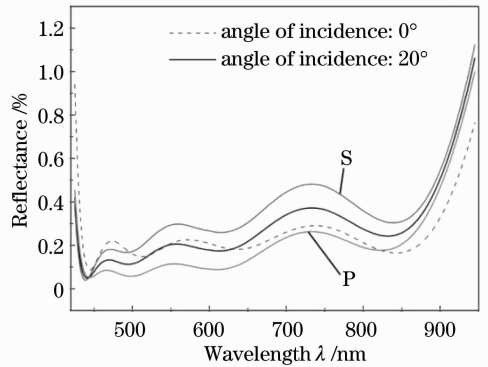


图 5 8 层减反射膜的反射率

Fig. 5 Reflectance of 8-layer anti-reflection coating

可见 8 层膜在 20° 入射时 S 光和 P 光的偏振分离不大于 0.3%, 整体膜系平均反射率小于 0.5%, 比图 3 中的膜系有了相当大的改进。

另外,图 2 中显示的第 10 个面入射角峰值处,上述 8 层膜的性能急剧退化,需要针对此界面设计特定的宽入射角减反射膜。基底材料仍然以 F_silica 为例,修改优化参数使入射角为 40°, 设计得到宽入射角减反射膜如图 6 所示,其 S 光、P 光和平均反射率曲线如图 7 所示。

由图 7 可见,该膜系平均反射率小于 1%, 40° 入射时的 S 光和 P 光的分离不大于 1%。为了得到更

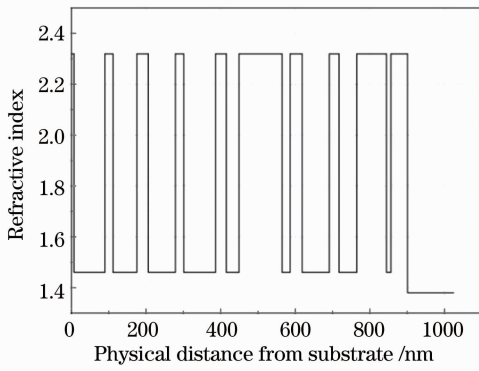


图6 40°入射角优化的减反射膜的折射率特性
Fig. 6 Refractive index profile of an optimal anti-reflection coating for 40° incident angle

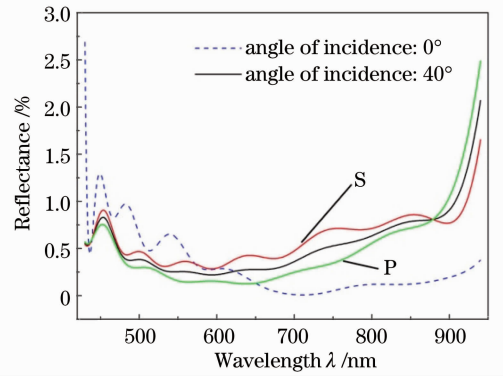


图7 20层减反射膜的反射率

Fig. 7 Reflectance of 20-layer anti-reflection coating

表1 最大视场角入射下DPC镜头改进前后的双向衰减和相位延迟

Table 1 Diattenuation and retardance of original and improved DPC lens with the maximum field angle

Wavelength /nm	Original diattenuation	Original retardance / (°)	Improved diattenuation	Improved retardance / (°)
443	0.083	50.6	0.0026	54.9
490	0.085	42.0	0.0157	41.2
565	0.031	30.3	0.0163	28.5
670	0.038	18.3	0.0198	17.8
763	0.058	11.0	0.0191	10.5
765	0.058	10.9	0.0191	10.4
865	0.095	4.52	0.0061	2.43
910	0.12	2.10	0.0086	2.45

好的性能,可以对于不同的基底材料进一步优化膜系。改进前后的整个镜头最大视场处的偏振特性变化量如表1所示。

由表1可以看到,在镜头和膜系设计改进后,DPC镜头的双向衰减已经控制在较小的水平(小于2%)。假设线偏振度的目标为0.2,则镜头双向衰减带来的误差为0.8%,对非偏通道的辐射测量影响已经较小,辐射测量精度得到保证。但是镜头的相位延迟则较大,在短波区域尤其突出,这是在膜系设计上偏重双向衰减造成的。

3.3 定标模型改进

结合(2)式和(3)式可以得到:大相位延迟导致目标信号通过镜头后,线偏光成分部分转化成圆偏振光,使得只检测线偏振的DPC偏振测量精度下降。为了解决偏振通道的测量精度问题,对DPC定标模型加以改进。

DPC初版样机采用POLDER的定标模型^[13]:

$$X_{lp}^{mksa} = A^k G^m T^{ka} g_{lp}^{ka} [P_1^{ka}(l, P) I_{lp}^k + P_2^{ka}(l, P) Q_{lp}^k + P_3^{ka}(l, P) U_{lp}^{ms}], \quad (4)$$

式中 X 是输出信号, A 代表定标系数, G 是增益, T 是偏振片透射率, g 是短波段的相对定标系数, P 是长波段的相对定标系数, l, p 是像元行、列数, k 是光

谱通道参考系数, m 是增益系数, s 是积分时间, a 是偏振通道数。POLDER的定标模型是假设镜头没有偏振效应的。若考虑在非零视场时镜头的偏振特性,即使是同一像元,对于不同偏振态的偏振光入射也会有不同的响应。

考虑相位延迟的影响后,将(4)式的模型扩展为

$$X_{lp}^{mksa} = A^k G^m T^{ka} g_{lp}^{ka} [P_1^{ka}(l, P) I_{lp}^k + P_2^{ka}(l, P) Q_{lp}^k + P_3^{ka}(l, P) U_{lp}^{ms} + P_4^{ka}(l, P) V_{lp}^k], \quad (5)$$

其中, $P_4^{ka}(l, P)$ 包含的就是镜头的相位延迟带来的信号变化。采用改进后的模型定标,可以通过镜头Mueller矩阵的定标来获取 I_{out} 、 Q_{out} 、 U_{out} 、 V_{out} ,得到相关参数后通过(3)式的换算,再代入(5)式的定标模型进行整机定标。

通过(5)式的定标模型改进,偏振测量精度进一步避免了受镜头相位延迟的影响。从表1中结果可知,去除相位延迟后,仅有小于2%的双向衰减影响偏振测量精度,可以满足DPC偏振精度为2%的要求。

4 结 论

多通道超广角偏振相机的镜头偏振特性导致了非偏通道辐射精度和偏振通道偏振精度之间的矛

盾。提出了一种结合设计与定标以同时满足两种精度要求的方法。该方法通过三个步骤:1)光学设计降低镜头偏振特性;2)通过膜系设计抑制双向衰减;3)改进定标模型控制相位延迟来满足精度要求。并以多角度偏振成像仪为例,分别给出了低偏镜头设计方法、低双向衰减膜系设计结果和改进的定标模型。改进前后的对比分析表明,该方法有效地减小了镜头偏振特性的影响,可以为采用类似方案的偏振相机精度设计提供参考。

精度是一个仪器系统性的问题。随着精度要求的提高,原先假设互相独立的各影响因素产生耦合效应,使得情况进一步复杂化。文中未提出的其他因素,如探测器偏振响应,非线性响应,偏振片附带相位延迟等,部分包含在定标模型中,可以通过定标解决;部分属于小量,在精度要求继续提高时再予以考虑。进一步的仪器不确定度分析和相关实验拟在后续的研究中进行。

参 考 文 献

- 1 F Waquet, B Cairns, K Knobelspiesse, *et al.*. Polarimetric remote sensing of aerosols over land [J]. *J Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, 114(D1): 1-23.
- 2 Cheng Tianhai, Chen Liangfu, Gu Xingfa, *et al.*. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1849-1855.
- 程天海, 陈良富, 顾行发, 等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1849-1855.

- 3 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501001.
- 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.
- 4 Leng Mei, Yang Yanfang, He Ying, *et al.*. Effect factors of the focal shift in spatial-variant polarized vector beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0526001.
- 冷梅, 杨艳芳, 何英, 等. 影响空间变化偏振矢量光束强聚焦后焦斑移动的因素[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0526001.
- 5 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.
- 崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- 6 Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. Method acquiring the demodulation coefficients of intensity-modulated spectropolarimeter by measuring reference light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412003.
- 宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412003.
- 7 J L Deuzé, P Goloub, M Herman, *et al.*. Aerosol remote sensing from POLDER measurements [J]. *IEEE*, 2003, 2: 1273-1275.
- 8 A K Sen, M Kakati. Instrumental polarization caused by telescope optics during wide field imaging [J]. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1997, 126(1): 113-119.
- 9 S-M F Nee. Error analysis for Mueller matrix measurement [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(8): 1651-1658.
- 10 B Daugherty, R Chipman. Low polarization microscope objectives [C]. *International Optical Design Conference*, 2010: 76521s.
- 11 K Rabinovitch, A Pagis. Polarization effects in multilayer dielectric thin films [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 2010, 21(12): 37-41.
- 12 R R Willey. Further guidance for broadband antireflection coating design [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(9): C274-C278.
- 13 T Bretidibat, Y Andre, J M Laherrere. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [C]. *SPIE*, 1995, 2553: 218-231.

栏目编辑: 张 腾