

大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证 实验研究

康 晴^{1,2}, 袁银麟¹, 李健军¹, 杨伟锋¹, 范慧敏^{1,2}, 钱鸿鹄^{1,2}, 吴浩宇¹, 郑小兵¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 为保证大气同步校正仪的偏振测量精度, 在研制的过程中需要对滤光片进行检测和筛选。设计了校正仪的偏振测量模型和滤光片的筛选条件, 分析了影响校正仪的偏振度测量精度的主要因素。以 490 nm 通道为例, 采用滤光片的光谱透射率和典型目标的光谱辐亮度数据, 分析了偏振通道间的相对透射率和带外响应相对于总响应的比值随目标光谱辐亮度形状的变化情况, 并对滤光片进行了筛选, 对校正仪进行了偏振度测量精度的验证。结果表明, 在大气目标偏振度 0~0.4 范围内、在偏振通道间的相对透射率的相对变化和带外响应的相对变化对偏振度产生的变化均不大于 0.4% 且二者合成不确定度应小于 0.5% 的筛选条件下, 可保证校正仪的偏振度测量精度。选用最佳效果筛选滤光片的校正仪的测量不确定度明显小于未经筛选滤光片的校正仪的测量不确定度, 证明了筛选方法的有效性。

关键词 测量; 偏振; 滤光片; 带外响应; 筛选; 精度验证

中图分类号 O432.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0312003

Filtration and Precision Verification of Optical Filters on Atmospheric Synchronous Corrector

Kang Qing^{1,2}, Yuan Yinlin¹, Li Jianjun¹, Yang Weifeng¹, Fan Huimin^{1,2},
Qian Honghu^{1,2}, Wu Haoyu¹, Zheng Xiaobing¹

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In order to guarantee the polarization accuracy of atmospheric synchronous corrector, it is necessary to test and filtrate its filters in the process of corrector development. The polarization measurement model of corrector and the filtration conditions of optical filters are designed, and the main factors which affect the polarization accuracy of corrector are analyzed. Taking the 490 nm channel as an example, using the spectral transmittance of optical filters and the spectral radiance data of typical targets, the relative transmittance between polarized channels and the changes of ratio of out-of-band response to total response with the spectral radiance shape of typical targets are analyzed, and the filtration of optical filters is performed. At last, the polarization measurement precision of the corrector is verified. The results show that the polarization accuracy of the corrector can be guaranteed when the changes of the relative transmittance between polarized channels and the changes of out-of-band response with total response are all not more than 0.4%, and the combined uncertainty is less than 0.5% in the range of atmospheric polarization 0 to 0.4. The uncertainty of a corrector with optimal selection filter is obviously smaller than that of a

收稿日期: 2016-08-18; 收到修改稿日期: 2016-11-01

基金项目: 国家 863 计划(2013AA7031021, 2015AA123702)、国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 康 晴(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事光学遥感器偏振定标方法方面的研究。

E-mail: qkang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学遥感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn(通信联系人)

corrector without optimal selection filter, which proves the effectiveness of the filtration method.

Key words measurement; polarization; optical filter; out-of-band response; filtration; precision verification

OCIS codes 120.5410; 120.2440; 120.4800

1 引 言

大气同步校正仪(以下简称校正仪)是我国近年来预研发展的一种星载光学偏振遥感器,通过同步获取光学遥感图像的角度、偏振和辐射信息,实现时空变化的气溶胶和水汽的探测,解决大气效应校正的难点,为光学成像遥感器高质量的图像数据反演提供同时和同地的大气参数,在研究全球气候变化和环境监测等方面有着重要的应用价值^[1-3]。目前,用于同步获取气溶胶、水汽及其他大气参数星载大气校正载荷有美国的 LAC^[4]、日本的 TANSO-CAI^[5]及 2014 年发射的大气探测仪 CAVIS^[6]。为了实现气溶胶参数的精确反演,根据法国偏振有效载 POLDER^[7-8]多年的运行效果,国际遥感界普遍建议在大气目标偏振度(DOLP)0~0.4 范围内、遥感器的偏振测量精度优于 0.5%的条件下,可实现气溶胶光学厚度 1%的反演精度,达到气溶胶粒子分布和微观物理特性反演等科学目标的应用要求^[9-10]。

校正仪采用通道式光学系统结合单元探测器的设计方案,实现宽波段的光谱覆盖和高精度的信息获取;采用滤光片实现波段划分,其中在短波至近红外波段拥有 490、670 和 870 nm 偏振光谱通道,每个偏振光谱通道通过 3 片滤光片和 3 片偏振片组合(0°、60°和 120°检偏器透光轴方向角的优化装置)实现光谱及偏振信息探测。根据前期理论分析研究^[11-13],影响偏振度测量精度的关键因素主要有偏振通道间的带内响应一致性和带外响应,其中带内响应一致性通常使用相对透射率校正。这两项参数均与滤光片的光谱透射率有关,具体表现为受制造工艺的限制,同一批次滤光片透光区的光谱透射率不可避免地存在差异,引起各偏振通道带内响应即相对透射率随目标光谱辐亮度的变化而不同。另一方面,滤光片的波长截止区存在散射光,即带外泄露,滤光片的这种散射光容易被仪器内部的探测器接收当作有效信号,导致各偏振通道产生带外响应。为保障大气同步校正仪的工程研制精度,迫切需要开展元器件和部件级的性能测试,其中滤光片的检测和筛选尤为关键。本文推导了校正仪的偏振测量模型;分析了影响偏振度测量精度的主要关键因素,即偏振通道间的带内响应一致性和带外响应;设计了一种滤光片的筛选方法。以 490 nm 通道为例,采用滤光片的光谱透射率和典型目标(天空散射目标、月球地表、海洋、沙漠、植被等)的光谱辐亮度数据,分析了偏振通道间的相对透射率和带外响应相对于总响应的比值随目标光谱辐亮度形状的变化情况,并对滤光片进行了筛选。最后,利用可调偏振度参考光源^[14]对校正仪进行了精度验证。

2 偏振测量模型

校正仪入瞳处目标的偏振态斯托克斯矢量 $[I, Q, U]$,根据通道式偏振遥感器的测量原理^[11-12]可知,校正仪的偏振通道响应 D_N^k 与其系统相对光谱响应度 $R(\lambda)$ 和入瞳处的光谱辐亮度 $L(\lambda)$ 之间的关系为

$$D_N^k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda) R(\lambda) \{1 + P [1 - 2/\exp(k)] \cos 2(\alpha^k + k\pi/3 - \beta)\} d\lambda + D_C^k, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I \\ \beta = \arctan(U/Q) / 2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 P 指接收方向上的目标偏振度, β 指目标偏振方位角, λ_{\min} 和 λ_{\max} 为校正仪具有响应的最短和最长波长, $\exp(k)$ ($k=0,1,2$)为各偏振通道检偏器的消光比, $\alpha^k + k\pi/3$ ($k=0,1,2$)为三个偏振通道检偏器的透射轴方向与参考坐标系 x 轴的夹角^[15],理想情况下,分别为 $0, \pi/3$ 和 $2\pi/3$ 。由于装配公差等原因,检偏器的透射轴方向与 x 轴夹角不可避免地存在误差,这里用 α^k 代表校正仪三个检偏器的透射轴方向与 x 轴夹角的相对角度偏差, D_C^k ($k=0,1,2$)为各偏振通道探测器测得的本底值。

定义相对积分光谱响应度(即其绝对光谱响应度与总响应度的比值)大于 1%的光谱范围($\lambda_1 \sim \lambda_u$)为带内波段,其他的光谱范围为带外波段^[16-17]。假设在 $\lambda_1 \sim \lambda_u$ 范围内,校正仪观测目标偏振度变化较小,均为 P ,同时检偏器的消光比 $\exp(k)$ [$\exp(k) > 10^4, k=0,1,2$]非常高时,(1)式可转化为

$$D_N^k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L(\lambda)R(\lambda) [1 + P \cos 2(\alpha^k + k\pi/3 - \beta_\lambda)] d\lambda + S_{OoB}^k + D_C^k, \quad (3)$$

其中,

$$S_{OoB}^k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_1} L(\lambda)R(\lambda) [1 + P \cos 2(\alpha^k + k\pi/3 - \beta)] d\lambda + \int_{\lambda_u}^{\lambda_{\max}} L(\lambda)R(\lambda) [1 + P \cos 2(\alpha^k + k\pi/3 - \beta)] d\lambda, \quad (4)$$

式中 λ_1 和 λ_u 分别为带内光谱范围的下限和上限波长, S_{OoB}^k ($k=0,1,2$) 为校正仪的带外偏振响应。

从定标的角度来看, 校正仪同一波段的三个偏振通道需共用一个定标系数 R_{bsw} , 通过偏振通道间的相对透射率 T^k 校正各通道的响应非一致性^[18], (3)式可转化为

$$D_N^k = [1 + P \cos 2(\alpha^k + k\pi/3 - \beta)] R_{bsw} L_{bsw}(\lambda) T^k + S_{OoB}^k + D_C^k, \quad (5)$$

式中 R_{bsw} 为目标光谱的平均响应度, $L_{bsw}(\lambda)$ 为目标光谱的平均光谱辐亮度, T^k 为校正仪各偏振通道间的相对透射率, 这里以 60° 偏振通道为参考通道, T^0 、 T^1 和 T^2 分别为检偏器的透过轴方向与 x 轴夹角为 0° 、 60° 和 120° 偏振通道相对于该参考偏振通道理想情况下的相对透射率, 其中任何情况下 T^1 为 1, 故视 T^1 为理想情况不作分析。

为了实现校正仪入瞳处的偏振态斯托克斯矢量的反演, 需要确定各偏振通道的相对透射率 T^k 。相对透射率是指偏振通道间带内响应的相对比值, 以其中一个通道的带内响应作为参考, 其他两个通道相对于该参考通道的相对比值^[11] 为

$$T^k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L(\lambda)R(\lambda_k) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} L(\lambda)R(\lambda_1) d\lambda}, \quad (6)$$

式中 $R(\lambda_k)$ 和 $R(\lambda_1)$ 分别指待测和参考偏振通道的相对光谱响应度, 通常由仪器内部滤光片的光谱透射率、探测器的响应度等部件的测量值计算获取, 表达式为

$$R(\lambda) = t(\lambda)r(\lambda) / t(\lambda_{new})r(\lambda_{new}), \quad (7)$$

其中,

$$\lambda_{new} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} R(\lambda)\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_u} R(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

式中 $t(\lambda)$ 为校正仪内部滤光片的光谱透射率, $r(\lambda)$ 为探测器的光谱功率响应度, λ_{new} 为校正仪偏振通道的中心波长。

在(5)式中, 当 α^k 的相对差异较小时, 由三角函数的正交性可知,

$$R_{bsw} L_{bsw}(\lambda) = \frac{1}{3} \sum_{k=0}^2 (D_N^k - S_{OoB}^k - D_C^k) / T^k. \quad (9)$$

利用(5)和(9)式可以反演获取校正仪入瞳处的偏振态斯托克斯矢量为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\beta \\ P \sin 2\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{\sum_{k=0}^2 (D_N^k - S_{OoB}^k - D_C^k) / T^k} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha^0 & \sin 2\alpha^0 \\ 1 & \cos 2(\pi/3 + \alpha^1) & \sin 2(\pi/3 + \alpha^1) \\ 1 & \cos 2(2\pi/3 + \alpha^2) & \sin 2(2\pi/3 + \alpha^2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (D_N^0 - S_{OoB}^0 - D_C^0) / T^0 \\ D_N^1 - S_{OoB}^1 - D_C^1 \\ (D_N^2 - S_{OoB}^2 - D_C^2) / T^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由(10)式可知, 影响偏振度 P 反演的主要参数有偏振通道间的相对透射率 T^k 以及带外响应 S_{OoB}^k , 这两项参数均与滤光片相关。由此可见, 滤光片的筛选是保障校正仪的设计指标、设计合理性的重要环节。

3 偏振度测量的主要影响因素分析

3.1 偏振通道间的相对透射率

(10)式对偏振通道间的相对透射率求偏导数, 分析偏振度与偏振通道间相对透射率的相对变化之间的

关系,其中各偏振通道的带外响应、本底响应值和偏振方位角均为理想条件,即 α^k 、 S_{OOB}^k 和 D_{C}^k 均取 0,则有

$$\begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\beta \\ P \sin 2\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{k=0}^2 D_{\text{N}}^k / T^k} \begin{bmatrix} D_{\text{N}}^0 / T^0 + D_{\text{N}}^1 + D_{\text{N}}^2 / T^2 \\ 2D_{\text{N}}^0 / T^0 - D_{\text{N}}^1 - D_{\text{N}}^2 / T^2 \\ \sqrt{3}D_{\text{N}}^1 - \sqrt{3}D_{\text{N}}^2 / T^2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} D_{\text{N}}^0 = \frac{1}{2} [1 + P \cos 2(0^\circ + \beta)] \\ D_{\text{N}}^1 = \frac{1}{2} [1 + P \cos 2(60^\circ + \beta)] \\ D_{\text{N}}^2 = \frac{1}{2} [1 + P \cos 2(120^\circ + \beta)] \end{cases} \quad (12)$$

偏振度与偏振通道间相对透射率的关系为

$$P = \sqrt{(2D_{\text{N}}^0 / T^0 - D_{\text{N}}^1 - D_{\text{N}}^2 / T^2)^2 + 3(D_{\text{N}}^1 - D_{\text{N}}^2 / T^2)^2} / \left(\sum_{k=0}^2 D_{\text{N}}^k / T^k \right). \quad (13)$$

由(13)式可以看出,偏振度与校正仪各偏振通道间的相对透射率有关。为了分析偏振通道间相对透射率对偏振度测量精度的影响,对 \bar{T}^0 和 \bar{T}^2 求偏导,则偏振度与偏振通道间相对透射率的关系为

$$\delta P_{\text{DoL}} = \frac{\partial P}{\partial T^0} \Big|_{\bar{T}^0 = T^0 + \delta T^0, P, \beta} \cdot \delta T^0 + \frac{\partial P}{\partial T^2} \Big|_{\bar{T}^2 = T^2 + \delta T^2, P, \beta} \cdot \delta T^2, \quad (14)$$

式中 δP_{DoL} 为校正仪的偏振度测量误差, $\partial P / \partial \bar{T}$ 为和通道相对透射率 \bar{T} 、入射光偏振度 P 、入射光偏振角 β 有关的偏导函数, \bar{T}^0 和 \bar{T}^2 分别为检偏器的透射轴方向与 x 轴夹角为 0° 偏振通道和 120° 偏振通道相对于 60° 偏振通道实际的相对透射率, T^0 和 T^2 分别为理想情况下的偏振通道的相对透射率,均取值为 1, δT^0 和 δT^2 分别为 T^0 和 T^2 的相对变化。

当校正仪偏振通道间相对透射率的相对变化 δT^0 和 δT^2 分别同时变化为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 时,对应偏振度的变化情况如图 1 所示。

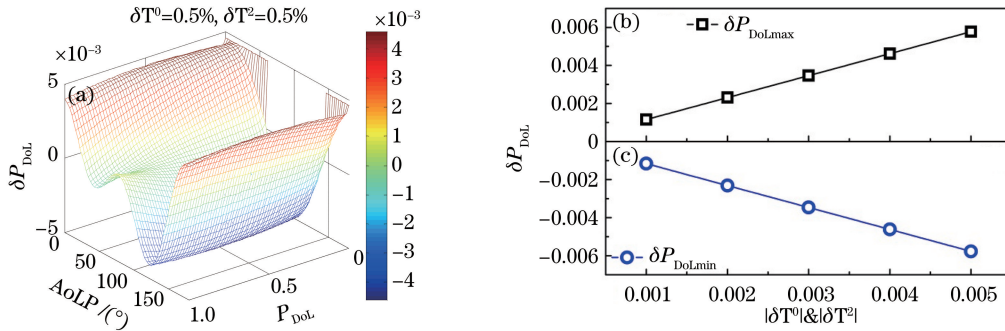


图 1 (a) 偏振度测量误差随偏振度和偏振角的变化情况; (b)(c) 偏振度测量误差与偏振通道间相对透射率相对变化的关系

Fig. 1 (a) Degree of polarization measurement error along with the degree of polarization and polarization angle; (b)(c) relationship between degree of polarization measurement error and the relative change of relative transmittance between polarized channels

如图 1(a)所示,经分析,当 δT^0 和 δT^2 变化数值相等、符号相反时,对应偏振度变化 δP_{DoL} 最大,且 δT^0 和 δT^2 的绝对值均小于 0.4% 时,偏振度变化的最大值为 4.62×10^{-3} ,可保证偏振通道间相对透射率对偏振度测量的影响小于 0.5% 。图 1(b)、(c)中,以 δT^0 为正值和 δT^2 为负值同时变化为例进行分析,在 $|\delta T^k|$ ($k=0,2$) 的变化范围为 $0.1\% \sim 0.5\%$ 时,随着相对透射率偏差的增大,偏振度测量误差的最大值呈线性递增趋势,最小值为 1.16×10^{-3} ,最大值为 5.77×10^{-3} ,如图 1(b)所示;偏振度测量误差的最小值呈线性递减趋势,最小值为 -5.77×10^{-3} ,最大值为 -1.16×10^{-3} ,如图 1(c)所示。因此,当偏振通道间相对透射率的相对变化不大于 0.4% 时,可保证偏振通道间的相对透射率对偏振度测量的影响小于 0.5% 。

3.2 带外响应

(10)式对带外响应进行求偏导数,分析偏振度和带外响应与带内响应比值的相对变化之间的关系,其中各偏振通道间的相对透射率、本底响应值和偏振方位角均为理想状态,即 T^0 、 T^2 均为 1, α^k 、 D_C^k 均取 0,则有

$$\begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\beta \\ P \sin 2\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{k=0}^2 (D_N^k - S_{OOB}^k) / T^k} \begin{bmatrix} (D_N^0 - S_{OOB}^0) / T^0 + (D_N^1 - S_{OOB}^1) + (D_N^2 - S_{OOB}^2) / T^2 \\ 2(D_N^0 - S_{OOB}^0) / T^0 - (D_N^1 - S_{OOB}^1) - (D_N^2 - S_{OOB}^2) / T^2 \\ \sqrt{3} (D_N^1 - S_{OOB}^1) - \sqrt{3} (D_N^2 - S_{OOB}^2) / T^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

因此,输出偏振度与带外响应的关系为

$$P = \frac{\sqrt{[2(D_N^0 - S_{OOB}^0) / T^0 - (D_N^1 - S_{OOB}^1) - (D_N^2 - S_{OOB}^2) / T^2]^2 + 3 [(D_N^1 - S_{OOB}^1) - (D_N^2 - S_{OOB}^2) / T^2]^2}}{\sum_{k=0}^2 (D_N^k - S_{OOB}^k) / T^k}. \quad (16)$$

由(16)式可以看出,偏振度的测量结果与带外响应有关。为了分析带外响应对偏振度测量精度的影响,对 S_{OOB}^0 、 S_{OOB}^1 和 S_{OOB}^2 求偏导,则偏振度和带外响应与带内响应比值的相对变化关系为

$$\delta P_{DoL} = \frac{\partial P}{\partial S_{OOB}^0} \Big|_{\bar{S}_{OOB}^0 = \delta S_{OOB}^0, P, \beta} \cdot \delta S_{OOB}^0 + \frac{\partial P}{\partial S_{OOB}^1} \Big|_{\bar{S}_{OOB}^1 = \delta S_{OOB}^1, P, \beta} \cdot \delta S_{OOB}^1 + \frac{\partial P}{\partial S_{OOB}^2} \Big|_{\bar{S}_{OOB}^2 = \delta S_{OOB}^2, P, \beta} \cdot \delta S_{OOB}^2, \quad (17)$$

其中,

$$\delta S_{OOB}^k = S_{OOB}^k / (D_N^k - S_{OOB}^k), \quad (18)$$

式中 δP_{DoL} 为校正仪的偏振度测量误差, $\partial P / \partial \bar{S}_{OOB}^k$ 为和带外响应 \bar{S}_{OOB}^k 、入射光偏振度 P 、入射光偏振角 β 有关的偏导函数, \bar{S}_{OOB}^0 、 \bar{S}_{OOB}^1 和 \bar{S}_{OOB}^2 分别为 0° 、 60° 和 120° 偏振通道实际的带外响应, S_{OOB}^0 、 S_{OOB}^1 和 S_{OOB}^2 分别为理想情况下的偏振通道带外响应,均取值为 0, δS_{OOB}^0 、 δS_{OOB}^1 和 δS_{OOB}^2 分别为 S_{OOB}^0 、 S_{OOB}^1 和 S_{OOB}^2 的偏差。

当各参量 S_{OOB}^0 、 S_{OOB}^1 和 S_{OOB}^2 均为 0, δS_{OOB}^0 、 δS_{OOB}^1 和 δS_{OOB}^2 分别同时变化为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5% 时,对应偏振度的变化情况如图 2 所示。

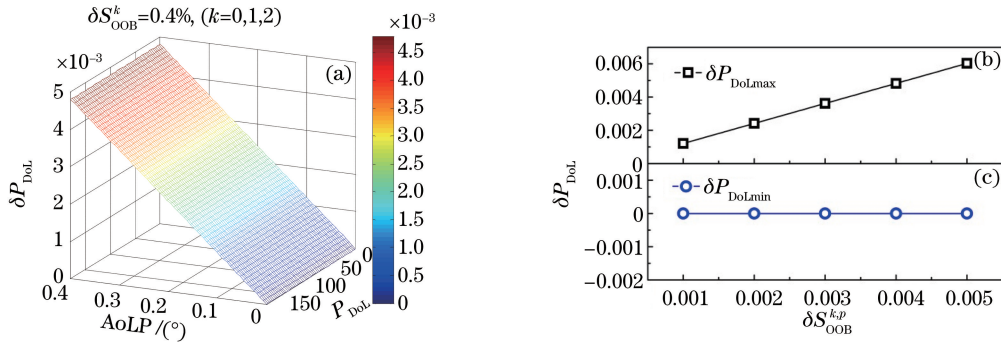


图 2 (a) 偏振度测量误差随偏振度和偏振角的变化情况; (b)(c) 偏振度测量误差与带外响应的关系

Fig. 2 (a) Degree of polarization measurement error along with the degree of polarization and polarization angle; (b)(c) relationship between degree of polarization measurement error and filter out-of-band response

如图 2(a)所示,以 δS_{OOB}^0 、 δS_{OOB}^1 和 δS_{OOB}^2 分别同时变化 0.4% 为例,当带外响应和偏振角不变时,偏振度测量误差随偏振度的增加而变大;当带外响应和偏振度不变时,偏振度测量误差随偏振角增加而变化。由图 2(b)、(c)可知,带外响应在 0.1%~0.5% 范围内,随着带外响应变化的增大,偏振度测量误差的最大值呈线性递增趋势,最小值为 1.21×10^{-3} ,最大值为 6.3×10^{-3} ,且当 δS_{OOB}^0 、 δS_{OOB}^1 和 δS_{OOB}^2 同时变化 0.4% 时,偏振度测量误差为 4.82×10^{-3} ,可保证带外响应对偏振度测量的影响小于 0.5%,如图 2(b)所示;带外响应在 0.1%~0.5% 范围内,偏振度测量误差的最小值均为 0,如图 2(c)所示。因此,目标偏振度在 0~0.4 范围内,当带外响应偏差不大于 0.4% 时,可保证带外响应对偏振度测量的影响小于 0.5%。

由以上分析可知,偏振通道间相对透射率的相对变化对偏振测量精度的影响主要与目标的偏振角有关,而带外响应与带内响应比值的相对变化对偏振测量精度的影响主要与目标的偏振度有关。目标偏振度在0~0.4范围内,为保证校正仪的偏振度测量精度,偏振通道间相对透射率的相对变化和带外响应的相对变化对偏振度产生的变化的合成不确定度应小于0.5%,即

$$u(P) = \sqrt{u^2(\delta T) + u^2(\delta S_{\text{OoB}}^k)} < 0.5\%, \quad \delta T \leq 0.4, \delta S_{\text{OoB}}^k \leq 0.4, \quad (19)$$

式中 $u(P)$ 是校正仪的合成不确定度, $u(\delta T)$ 是偏振通道间相对透射率的相对变化对校正仪的偏振度产生的不确定度, $u(\delta S_{\text{OoB}}^k)$ 是带外响应的相对变化对校正仪的偏振度产生的不确定度。

4 滤光片的筛选

在校正仪的研制过程中,每个偏振光谱通道设计和外协制作了20片滤光片,从中筛选出最佳的3片以保证校正仪的偏振测量精度。校正仪在490、670和870 nm光谱通道采用的探测器为硅光电二极管。根据硅光电二极管短波光谱响应度远远小于近红外波段的特性,相对于670和870 nm光谱通道,490 nm光谱通道滤光片的带外响应与带内响应的比值最大,因此本文以490 nm通道的滤光片筛选为例进行筛选过程分析。依据20片滤光片的中心波长、带内带宽和中带宽的检测数据,初步筛选出符合条件的滤光片有5、15、17、18、6、7、8和11号,以下给出具体的优选过程。

4.1 滤光片的带内光谱透射率的筛选

通过输入不同目标(例如天空散射目标、月球地表、海洋、沙漠、植被等)的光谱辐亮度,并利用滤光片的光谱透射率数据,分析滤光片的带内响应,获取校正仪偏振通道间的相对透射率。490 nm波段滤光片的带内光谱透射率曲线如图3(a)所示和各种典型目标光谱辐亮度曲线如图3(b)所示,其中1表示天空漫射的典型辐亮度;2代表月球地表反射的典型辐亮度;3为典型海洋离水辐亮度;4为沙漠地表典型辐亮度;5为植被目标典型辐亮度;6为传统卤钨灯积分球光源典型辐亮度;7表示饱和辐亮度,辐照度为1个太阳常数的光源正入射照明反射率为1的朗伯型目标反射的辐亮度。

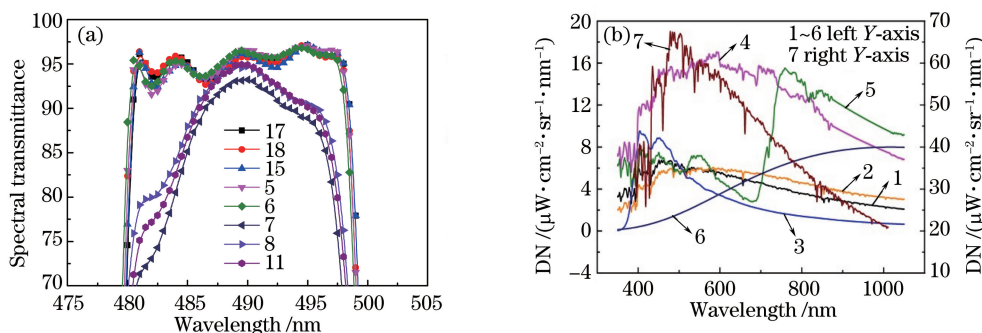


图3 (a) 490 nm 波段滤光片的带内光谱透射率曲线; (b) 各种典型目标的光谱辐亮度曲线

Fig. 3 (a) Curves of filter spectral transmittance in 490 nm; (b) curves of spectral radiance of various typical targets

通过(7)式利用490 nm波段滤光片的光谱透射率分析校正仪的带内响应情况如表1所示。利用(7)式分析490 nm波段各滤光片的光谱透射率引起的相对透射率变化如表2所示。

由表1可知,同一滤光片对不同的目标(例如天空散射目标、月球地表、海洋、沙漠、植被等)会产生不同的带内响应,带内响应与滤光片的光谱透射率有关,如(6)和(7)式所示;不同编号的滤光片对同一目标产生的带内响应也略有差异,这是因为不同编号的滤光片透光区的光谱透射率不可避免地存在差异,引起各偏振通道的带内响应即相对透射率随目标光谱辐亮度的变化而不同。表2中,随不同目标光谱辐亮度的变化影响,15、5、17、18和11号滤光片各偏振通道相对透射率的最大差异值变化分别为0%、0.2%、0.1%、0.3%和0.3%,满足相对透射率的不超过0.4%的筛选条件,6、7和8号滤光片的相对透射率的变化超过0.4%。

表 1 利用 490nm 波段滤光片的光谱透射率分析带内响应的结果

Table 1 In-band response results via spectral transmittance of filters in 490 nm

Typical target	In-band response							
	15	5	17	18	6	7	8	11
Saturation radiance	18850.98	18857.40	18858.00	18878.70	18954.80	17742.90	18450.20	18055.56
Diffuser radiance	1256.73	1257.16	1257.20	1258.58	1263.70	1182.87	1230.00	1203.71
Lunar radiance	1138.98	1139.15	1139.43	1140.29	1144.70	1071.48	1114.30	1090.55
Blue ocean toa radiance	1361.63	1362.94	1361.98	1364.94	1371.50	1284.95	1335.70	1306.72
Desert toa radiance	3015.25	3015.53	3016.48	3018.49	3030.01	2836.50	2949.30	2886.76
Grassland toa radiance	1184.11	1184.79	1184.50	1186.37	1191.50	1115.27	1159.60	1134.57
Norm 2850 KB body	29.32	29.28	29.34	29.28	29.35	27.52	28.62	28.04

表 2 利用 490 nm 波段滤光片的光谱透射率分析相对透射率变化的结果

Table 2 Relative transmittance via spectral transmittance of filters in 490 nm

Typical target	δT							
	15	5	17	18	6	7	8	11
Saturation radiance	1	1.000	1.000	1.001	1.006	0.941	0.979	0.958
Diffuser radiance	1	1.000	1.000	1.001	1.006	0.941	0.979	0.958
Lunar radiance	1	1.000	1.000	1.001	1.005	0.941	0.978	0.958
Blue ocean toa radiance	1	1.000	1.000	1.002	1.007	0.944	0.981	0.959
Desert toa radiance	1	1.000	1.000	1.001	1.005	0.941	0.978	0.957
Grassland toa radiance	1	1.001	1.000	1.002	1.006	0.942	0.979	0.958
Norm 2850 KB body	1	0.999	1.001	0.999	1.001	0.939	0.976	0.956
Maximum variation of in-band transmittance	1	0.002	0.001	0.003	0.006	0.005	0.005	0.003

4.2 滤光片带外光谱透射率的筛选

通过滤光片的光谱透射率和典型目标(例如天空散射目标、月球地表、海洋、沙漠、植被等)的光谱辐亮度数据,分析校正仪的带外响应相对于总响应的比值随目标光谱辐亮度形状的变化情况。表 3 给出了利用 490 nm 波段滤光片的光谱透射率分析带外响应与总响应之比的结果。

表 3 利用 490 nm 波段滤光片的光谱透射率分析带外响应与总响应之比

Table 3 Ratio of out-of-band response to total response of optical filters via spectral transmittance of filters in 490 nm

Typical target	$\delta S_{\text{OoB}}^b / \%$							
	15	5	17	18	6	7	8	11
Saturation radiance	0.138	0.132	0.149	0.145	0.118	0.367	0.371	0.363
Diffuser radiance	0.138	0.132	0.149	0.145	0.118	0.367	0.372	0.363
Lunar radiance	0.149	0.140	0.161	0.157	0.112	0.381	0.377	0.368
Blue ocean toa radiance	0.116	0.115	0.125	0.121	0.118	0.337	0.361	0.352
Desert toa radiance	0.149	0.140	0.162	0.157	0.069	0.382	0.376	0.368
Grassland toa radiance	0.175	0.142	0.195	0.187	0.028	0.369	0.385	0.375
Norm 2850 KB body	0.267	0.207	0.315	0.309	0.028	0.558	0.464	0.457

由表 3 可知,筛选之后的 15、5、6、17 和 18 号滤光片的带外响应与带内响应之比(即 δS_{OoB}^b)分别为 0.267%、0.207%、0.028%、0.315%和 0.309%,均小于 0.4%,7、8 和 11 号滤光片的带外响应与带内响应之比分别为 0.558%、0.464%和 0.457%,滤光片的带外泄漏有了明显改善。表 3 中最后一行计算的数值偏大的主要原因是传统卤钨灯积分球光源近红外波段与 490 nm 波段辐亮度的比值大于其他典型目标,导致带外响应与总响应之比偏大。

4.3 滤光片筛选结果

根据 490 nm 滤光片的带内光谱透射率的筛选结果和带外光谱透射率的筛选结果,可得到各滤光片的合成不确定度,结果如表 4 所示。

表 4 490 nm 波段滤光片的筛选结果

Table 4 Filtration results of optical filters in 490 nm

Parameter	Uncertainty / %							
	15	5	17	18	6	7	8	11
Relative transmittance δT	0	0.2	0.1	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3
Out-of-band response δS_{OOB}	0.267	0.21	0.32	0.31	0.03	0.56	0.46	0.46

由表 4 可知,490 nm 波段的 15、5、17 和 18 号滤光片的带内光谱透射率和带外光谱透射率相对变化偏差最小,选用最佳效果 15、5 和 17 号滤光片作为筛选校正仪的滤光片部件;6、7、8 和 11 号滤光片的带内光谱透射率和带外光谱透射率的相对变化偏差较大,不满足合成不确定度小于 0.5% 的筛选条件,选用较差效果 7、8 和 11 号滤光片作为对比组校正仪的滤光片部件。根据(14)、(17)和(19)式的计算,选用 15、5 和 17 号滤光片的校正仪和选用 7、8 和 11 号滤光片的校正仪的测量不确定度分别为 0.34% 和 0.70%。

5 偏振测量精度验证实验研究

偏振测量精度是指校正仪经过偏振定标后,其偏振度测量值相对于偏振度参考值的偏离程度,采用自然光光源和可调偏振度光源^[14](VPOLS-II),对分别选用最佳效果 15、5 和 17 号滤光片和较差效果 7、8 和 11 号滤光片的校正仪进行实际测量效果的精度验证。

偏振通道间相对透射率的相对变化是影响偏振测量精度的关键因素之一,主要与目标的光谱辐亮度曲线有关。采用偏振度接近于 0 的光谱可调积分球光源(STIS)^[12]作为入射光源进行验证。调节 STIS 在校正仪 490 nm 通道内输出 4 种光谱辐亮度曲线如图 4(a)所示,中心波长分别为 474.5、475.9、496.8 和 499.7 nm,带宽约为 30 nm。STIS 输出的偏振态输出通过光谱偏振分析仪^[19]进行了检测,其平均值偏振度为 0.067%,如图 4(b)所示。

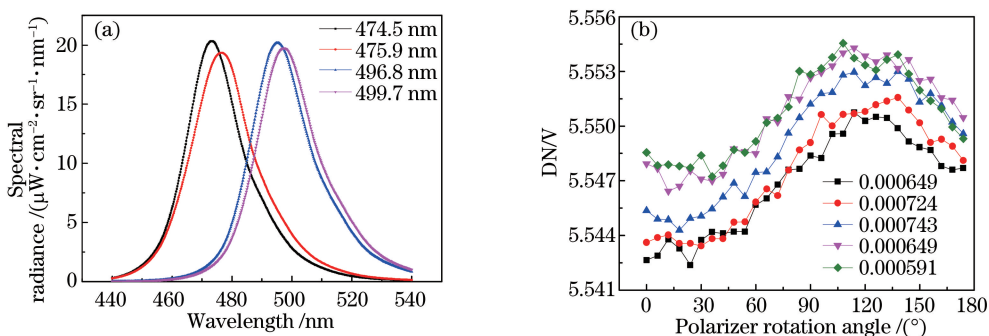


图 4 (a) STIS 输出光谱功率曲线; (b) STIS 494 nm 光谱输出的偏振态检测结果

Fig. 4 (a) Output spectral power curves of STIS; (b) polarization state testing results of STIS in 494 nm

校正仪测量 STIS 的偏振度结果如表 5 所示。从表 5 中可知,光谱辐亮度曲线的变化引起校正仪偏振通道间相对透射率的变化,进而导致偏振测量精度下降;选用 15、5 和 17 号滤光片的校正仪的测量不确定度明显小于选用 7、8 和 11 号滤光片的校正仪的测量不确定度,证明了筛选方法的有效性。

表 5 STIS 的偏振输出结果

Table 5 Polarization output of STIS

Status of STIS /nm	474.5	475.9	495.8	499.7
P_{DOL} of STIS / %		0.07		
Without optimal selection / %	1.08	0.92	0.36	0.57
Optimal selection / %	0.41	0.36	0.02	0.34

采用可调偏振度光源 VPOLS-II 验证校正仪在各种偏振度条件下的偏振测量精度。VPOLS-II 主要由入射光源和偏振态调节器两部分组成,其发光介质为超连续激光器,输出光谱形状是固定的,光谱辐亮度曲线如图 5 所示,在该光谱形状条件下进行校正仪的偏振测量精度验证^[20]。

实验时,调节内调焦平行光管以保证校正仪的中心视场与 VPOLS-II 的偏振态调节器的两玻璃板(初始

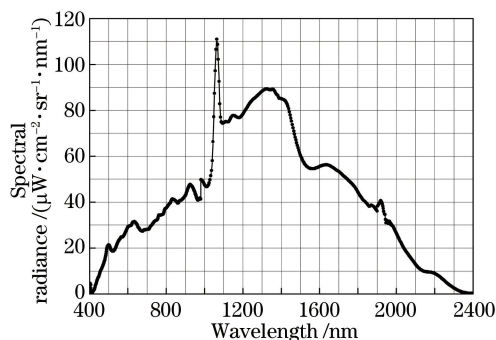


图 5 超连续白光激光器输出光谱功率曲线

Fig. 5 Output spectral power curve graph of supercontinuum system white-light laser

位置)准直。VPOLS-II 输出 0%、5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 计 7 种状态偏振度参考值。校正仪各偏振通道在 VPOLS-II 每个偏振度参考值点重复测量 50 次,并将校正仪测量值 P 和 VPOLS-II 偏振度参考值 P_V 进行对比分析。

根据测量不确定度的合格评定通用比对标准,用 E_n 值对校正仪的实验测量值和 VPOLS-II 偏振度参考值的一致性进行评价^[21],表达式为

$$E_n = |P - P_V| / \sqrt{u^2(P) + u^2(P_V)}, \quad (20)$$

式中 P 是校正仪的偏振度测量值; P_V 是 VPOLS-II 偏振度参考值,通过 VPOLS-II 内部平板玻璃的折射率和旋转角度理论计算获得^[14]; $u(P)$ 是校正仪的合成不确定度,按 0.5% 计算; $u(P_V)$ 为 VPOLS-II 的合成不确定度^[14]。

选用 15、5 和 17 号滤光片的校正仪和选用 7、8 和 11 号滤光片的校正仪偏振度测量值 P 和 VPOLS-II 偏振度参考值 P_V 的对比结果,如表 6 所示。

表 6 E_n 值的计算结果
Table 6 Results of E_n value

$P_{DoL}/\%$		0	5	10	15	20	25	30
Without optimal selection	$ P - P_V /\%$	0.2	0.13	0.3	0.46	0.62	0.79	0.7
	$u(P_V)/\%$	1.3	1.1	0.89	0.69	0.54	0.47	0.42
	$u(P)/\%$				0.70			
	E_n	0.14	0.10	0.26	0.47	0.70	0.94	0.86
Optimal selection	$ P - P_V /\%$	0.96	0.56	0.61	0.68	0.62	0.56	0.51
	$u(P_V)/\%$	1.3	1.1	0.89	0.69	0.54	0.47	0.42
	$u(P)/\%$				0.34			
	E_n	0.65	0.43	0.54	0.69	0.80	0.81	0.78

由表 6 可知,选用 7、8 和 11 号滤光片的校正仪的测量不确定度明显大于选用 15、5 和 17 号滤光片的校正仪的测量不确定度;偏振度在 0~0.40 范围内,校正仪的实验测量值和 VPOLS-II 偏振度参考值的一致性系数 E_n 值均小于 1,说明选用 15、5 和 17 号滤光片的校正仪具备 0.5% 的偏振测量精度,证明了滤光片筛选方法的有效性。

6 结 论

滤光片作为滤光片型偏振光学遥感器偏振定标的重要组成部件,是保障偏振光学遥感器设计性能指标、设计合理性的必要条件。建立了校正仪的偏振测量模型,分析了影响校正仪偏振度测量精度的关键因素即偏振通道间的相对通过率和带外响应,设计了滤光片的筛选条件,并以 490 nm 波段滤光片的筛选过程为例,证明了筛选方法的有效性。设计的滤光片筛选方法可保障校正仪对地观测的应用需求,为类似的滤光片型偏振光学遥感器的工程研制、性能评估和量化应用等提供理论依据和数据支持。

在进行偏振定标精度验证时采用的是 VPOLS-II,其发光介质为超连续激光器,虽具有窄带波段和连续

波段输出功能,可以验证带外响应的相对变化对偏振测量精度的影响,但不具备光谱形状可调功能,在测试验证方面具有一定的限制,在后续的工作中会采用 STIS 作为输入。

参 考 文 献

- [1] Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Sun Bin, *et al.* Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2015, 23(3): 652-659.
胡亚东, 胡巧云, 孙 斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(3): 652-659.
- [2] Huang Wenjuan, Cui Wenyu, Yi Weining, *et al.* Calibration processing for multi-spectral polarimetric atmospheric detection system[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*. 2015, 10(4): 350-356.
黄文娟, 崔文煜, 易维宁, 等. 多光谱偏振大气探测系统定标处理[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(4): 350-356.
- [3] Wang Hongbo, Hu Xiuqing, Zhang Lu, *et al.* Polarization correction for grating dispersive imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812004.
王宏博, 胡秀清, 张 璐, 等. 光栅色散型成像光谱仪的偏振校正方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812004.
- [4] Shimoda H. Overview of Japanese earth observation programs[C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7474: 74740G.
- [5] Pacifici F. An automatic atmospheric compensation algorithm for very high spatial resolution imagery[R]. *Digital Globe*, 2014.
- [6] Chen Liangfu, Li Shenshen, Tao Jinhua, *et al.* Research and application on quantitative retrieval of aerosol remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2011.
陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] Deschamps P Y, Herman M, Podaire A, *et al.* The POLDER instrument: mission objectives[C]. *Proceedings of SPIE*. 1992, 1747: 72-91.
- [8] Goloub P, Deuze J L, Herman M, *et al.* Analysis of the POLDER, airborne polarization measurements performed over clouds covers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1994, 32(1): 78-88.
- [9] Leroy M, Deuzé J L, Bréon F M, *et al.* Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17023-17037.
- [10] NPOESS I P O. Integrated operational requirements document (IORD) II[J]. NPOESS Integrated Program Office, 2001.
- [11] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, *et al.* Polarization calibration methods of channel-type polarization remote sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*. 2015, 10(4): 343-349.
康 晴, 袁银麟, 李健军, 等. 通道式偏振遥感器偏振定标方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(4): 343-349.
- [12] Yuan Yinlin. Design and application of a spectrally tunable integrating sphere reference source with large exit aperture [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 75-107.
袁银麟. 大口径光谱可调积分球参考光源的研制与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 75-107.
- [13] Fuqua P D, Panetta C J, Barrie J D, *et al.* Out of band scatter measurements from OLI optical bandpass filters[C]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8510: 851009.
- [14] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412003.
康 晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412003.
- [15] Wu Guodong, Song Dan. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1727-1730.
吴国栋, 宋 丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(11): 1727-1730.
- [16] Barnes R A, Yeh E, Eplee R E. SeaWiFS technical report series[R]. Washington: NASA Tech Memo, 1996, 39: 104566.
- [17] Barnes R A, Butler J J. Modeling spectral effects in Earth-observing satellite instruments[C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6744: 67441K.
- [18] Liu Xiao, Zhang Lei, Wang Feng, *et al.* Non-uniform calibration method in polarization imaging detection system[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(18): 209-211.
刘 晓, 张 磊, 王 峰, 等. 偏振成像探测系统的非一致性校正方法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(18): 209-211.

- [19] Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.* A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1223001.
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1223001.
- [20] Kang Qing. Design and test of variable polarization light source with large dynamic range [D]. Hefei: Anhui University, 2015: 9-13.
康 晴. 大动态范围可调偏振度参考光源的研制与检测[D]. 合肥: 安徽大学, 2015: 9-13.
- [21] Ni Yucui. Practical evaluation of measurement uncertainty[M]. 4th ed. Beijing: China Metrology Press, 2014: 254-255.
倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 4 版. 北京: 中国计量出版社, 2014: 254-255.