

基于光谱调制的线偏振测量技术研究及精度验证

石晶晶^{1,2}, 胡亚东^{2*}, 李孟凡², 刘吴昊^{1,2}, 洪津^{1,2}¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;²中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 基于光谱调制的线偏振测量技术通过光谱调制模块可将入射光的偏振信息调制到光谱维。光谱调制模块由消色差 1/4 波片、多级波片和偏振分束器组成,能够在单次测量中获取目标的线偏振及光谱信息。将调制模块和光栅光谱仪相结合,设计了双通道偏振测量系统。推导了系统偏振测量模型,分析了光谱仪光谱展宽对调制光谱的影响,并采用分周期最小二乘曲线拟合方法实现了对偏振信息的解调。此外,搭建了测试装置来验证测量系统的性能。首先,利用完全线偏光对多级波片的延迟量和系统的偏振效率进行了标定。然后,利用可调偏振度光源验证了系统的偏振测量精度。实验结果表明,可调偏振度光源输出的理论线偏振度值与测量值间的最大绝对偏差为 1.11%,线偏振方位角的最大偏差为 0.7°,即所提系统具有较高的偏振测量精度。

关键词 测量; 偏振; 光谱调制; 解调; 偏振测量精度

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0212003

Research and Accuracy Verification of Linear Polarization Measurement Technology Based on Spectral Modulation

Shi jingjing^{1,2}, Hu Yadong^{2*}, Li Mengfan², Liu Wuha^{1,2}, Hong Jin^{1,2}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The linear polarization measurement technology based on spectral modulation can modulate the polarization information of incident light to the spectral dimension through the spectral modulation module. The spectral modulation module is composed of an achromatic quarter-wave plate, a multiple-order wave plate and a polarization beam splitter, which can obtain the linear polarization and spectral information of the target in a single measurement. With the combination of modulation module and grating spectrometer, a dual-channel polarization measurement system is designed. The polarization measurement model of the system is derived, the influence of spectral broadening on the modulation spectrum is analyzed, and the partial periodic least squares curve fitting method is used to demodulate the polarization information. Moreover, a test device is built to verify the performance of the measurement system. First, the complete linear polarization light is used to calibrate the retardation of the multiple-order wave plate and the polarimetric efficiency of the system. Then, the polarization measurement accuracy of the system is verified by using the variable polarization light source. The experimental results show that maximum absolute deviation between the theoretical value and the measured value of degree of linear polarization of the variable polarization light source is 1.11%, and the maximum deviation of angle of linear polarization is 0.7°, which means the proposed system has high polarization measurement accuracy.

Key words measurement; polarization; spectral modulation; demodulation; accuracy of polarization measurement

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-23; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 装备预研项目(305090306)

通信作者: *huyadong@aiofm.ac.cn

1 引言

静态光谱偏振探测技术是近些年发展起来的一种新型遥感探测方法。融合光谱探测和偏振探测技术能够在单次测量中获取被测目标光谱信息及各单谱段的偏振信息^[1-3]。这种多维信息获取方法不仅提高了光学遥感探测获取的信息量,在针对动态变化目标的测量时还能够克服传统分时偏振测量和分孔径偏振测量的时间匹配和空间匹配问题,在目标识别、大气气溶胶遥感、生物医学诊断和国土资源勘察等领域具有非常广泛及重要的应用^[4]。

早在 1999 年,Okamoto 等^[5-6]就提出了偏振光谱强度调制(polarization spectral intensity modulation, PSIM)测量方法。随后,其成为了静态光谱偏振探测技术的热点研究方向。研究人员通过在不同类型的光谱仪光路中加入调制模块实现了同时测量 Stokes 元素谱,进而完成了偏振光谱的快速测量。偏振调制模块由快轴成 45° 夹角的多级延迟器和线偏振片组成,通过多级延迟器可产生 3 个不同频率的载波。将入射光的 Stokes 矢量分别调制在不同载波上,再利用频率分析的方法将偏振信息解调,从而可实现全 Stokes 矢量信息的获取。然而,为了保证各 Stokes 矢量在频域上彼此分离以及复原偏振光谱的分辨率,光谱仪需要具有较高的光谱分辨率。Snik 等^[7]在光谱强度调制基础上,将消色差 $1/4$ 波

片和多级延迟器组合,在只引入一个高频调制载波的情况下就实现了对入射光线偏振信息的调制,进而完成了对线偏振 Stokes 矢量的测量。荷兰国家航天局采用文献[7]中的技术研制了行星大气探测器 SPEX (Spectropolarimeter for Planetary EXploration),计划将其作为火星探测的有效载荷以研究火星大气气溶胶详细信息,SPEX 是静态光谱偏振测量技术的成功应用^[8]。国内王新全等^[9-11]对偏振光谱调制(spectral modulation, SM)技术也进行了很多有益的探索,但是研究大都集中在单通道测量方法上,并且对系统的验证以无偏光和完全偏振光为主,不足以全面科学地评价测量系统的性能。

本文基于 SM 偏振测量的原理,将 SM 调制模块和光栅光谱仪结合,设计了双通道线偏振测量系统。根据测量模型确定了用于偏振信息解调的系统参数,结合具体方案搭建了实验装置,并对工作波段内多级波片延迟量及系统偏振效率进行了标定。最后,通过分周期最小二乘拟合方法对部分偏振光的测量结果进行解调,并计算了测量值和理论值之间的绝对偏差,完成了对实验系统偏振测量精度的评估及验证。

2 基本原理分析

2.1 光谱调制原理

SM 偏振测量系统框图如图 1 所示,该系统包括偏振 SM 模块和光谱仪信息获取模块。

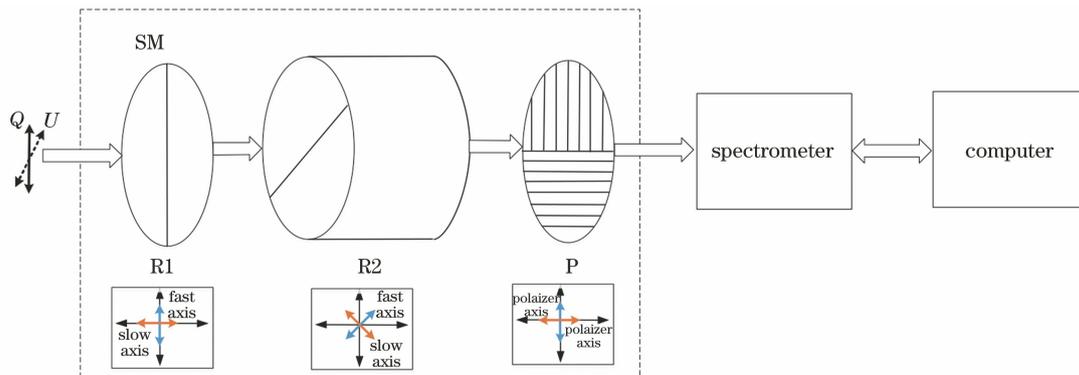


图 1 SM 偏振测量系统框图

Fig. 1 Block diagram of SM polarization measurement system

SM 模块由消色差 $1/4$ 波片 R1、多级波片 R2 及偏振分光棱镜 P 组成。波片是一种复合双折射晶体,当入射光经过波片时,波片可以将偏振矢量分解成沿慢轴方向(o 光)和沿快轴方向(e 光)的正交分量。由于 o 光和 e 光的折射率不同,进而两者在晶体中传播时会产生光程差,因此两正交光束间会产生相位延迟。在 SM 模块中,消色差 $1/4$ 波片的

快轴方向与水平方向垂直,定义该快轴方向为 0° 线偏光方向,故入射光的 Stokes 矢量中的 Q 分量经过该波片时偏振态不发生改变。然而,当 U 分量经过该波片时,由于 o 光和 e 光间存在 90° 的相位延迟,故此时其会转换成圆偏 V 分量。多级波片 R2 的快轴方向与水平方向成 45° 夹角,将 Q、V 分量等分并投影到 R2 的快轴和慢轴上,此时两部分光会

产生不同的相位延迟,延迟量与多级波片的厚度和波长有关。当波片厚度一定时,由于偏振态会随波长改变,故通过波长的变化可实现对被测光偏振态的调制。偏振分光棱镜具备偏振分析器的功能,其参考方位角与水平方向分别成 0° 和 90° ,故其相当于两个检偏方向相互垂直的线偏振片。光栅光谱仪用于测量调制模块的输出功率谱。在理想情况下,系统中各偏振元件的 Mueller 矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_{R1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_{R2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda}\right] & 0 & -\sin\left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda}\right] \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \sin\left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda}\right] & 0 & \cos\left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda}\right] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & k & 0 & 0 \\ k & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k = \pm 1, \quad (3)$$

式中: $\delta(\lambda) = \Delta n(\lambda)d$ 为多级波片引入的延迟量,其中 $\Delta n(\lambda)$ 和 d 分别为多级波片的双折射率差和厚度; λ 为波长; $k = \pm 1$ 表示偏振分束棱镜的垂直和水平检偏方向,分别用 s 光和 p 光表示。SM 模块的 Mueller 矩阵可以通过偏振器件的 Mueller 矩阵级联得到。假定入射线偏振光的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_{in} = I(\lambda) [1 \quad q(\lambda) \quad u(\lambda) \quad 0]^T, \quad (4)$$

式中: $I(\lambda)$ 为入射光光强; $q(\lambda)$ 和 $u(\lambda)$ 均为归一化的 Stokes 分量。

出射光的 Stokes 矢量为系统 Mueller 矩阵和入射光的 Stokes 矢量的乘积,其表达式为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_p \mathbf{M}_{R2} \mathbf{M}_{R1} \mathbf{S}_{in}. \quad (5)$$

由于光电探测器只对光强敏感,故出射的 SM 功率谱为

$$I_{s/p} = \frac{1}{2} I(\lambda) \left\{ 1 \pm P_L(\lambda) \cos\left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} + 2\phi(\lambda)\right] \right\}, \quad (6)$$

其中

$$P_L(\lambda) = \sqrt{q^2(\lambda) + u^2(\lambda)}, \quad (7)$$

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{u(\lambda)}{q(\lambda)}\right], \quad (8)$$

$P_L(\lambda)$ 和 $\phi(\lambda)$ 分别为入射光的线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP) 和线偏振方位角 (angle of linear polarization, AoLP)。

SM 偏振测量技术借鉴了通信系统中双边带幅度调制技术及频分复用思想,首先通过多级波片产生可变相位延迟的方式引入高频载波信号,再利用低频的 Stokes 光谱信号控制高频载波,如(6)式所示,从而将入射光的 DoLP 和 AoLP 分别调制在余弦载波的振幅和相位上。设定多级波片的延迟量为 $21 \mu\text{m}$,对上述调制过程进行了仿真,如图 2 所示。可以看出,SM 周期从短波到长波依次变大,这是因为多级波片引入的相位差和波数呈线性关系,在一个调制周期内,调制光谱的相位变化为 2π ,因此

$$\delta(\lambda) \left(\frac{1}{\lambda_k - \Delta\lambda/2} - \frac{1}{\lambda_k + \Delta\lambda/2} \right) = 1, \quad (9)$$

式中: $\Delta\lambda$ 表示调制周期; λ_k 为中心波长值。

当 $\delta(\lambda) \gg \lambda$ 时,调制周期为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_k^2}{\delta(\lambda_k)}. \quad (10)$$

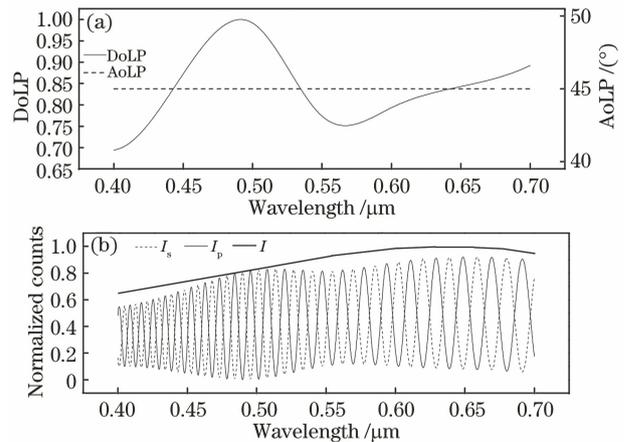


图 2 调制过程仿真。(a)入射线偏光的归一化参数; (b)调制光谱的仿真曲线

Fig. 2 Simulation of spectral modulation process. (a) Normalization parameters of incident linear polarized light; (b) simulation curve of modulation spectrum

2.2 光谱展宽对调制光谱的影响

光栅光谱仪基于空间色散原理,通过光栅作用使得入射到探测器像面的狭缝像按照一定的波长顺序进行排列。在实际情中,光谱仪并非理想的,单色光入射后会产生明显的光谱展宽^[12]。带宽函数 (bandpass function) 可以表征光谱仪对给定波长的单色光源的光谱响应,可以用来描述光谱展宽现象。由于带宽函数会受到入口狭缝宽度、探测器像元宽

度、光学系统像差和光栅衍射效率的影响,故其通常为高斯型函数,高斯函数的半峰全宽即为光谱仪的光谱分辨率^[13]。光谱仪的测量光谱是真实光谱和带宽函数的卷积结果,其表达式为

$$F(\lambda_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\lambda)P(\lambda - \lambda_i)d\lambda = B(\lambda_i) * P(\lambda_i), \quad (11)$$

$$P(\lambda - \lambda_i) = K \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_i} \right)^2 \right], \quad (12)$$

式中: * 是卷积符号; K 是常数; λ_i 是第 i 个波段的中心波长; σ_i 是高斯曲线标准差; $B(\cdot)$ 是真实光谱; $P(\cdot)$ 是带宽函数。

SM 模块可将入射光的 Stokes 光谱调制在高频载波上,此时光谱仪光谱展宽会使得采样的光谱数据不再是孤立的采样点,而会与旁边的数据点耦合,这就导致了调制幅度的下降。通过数值仿真的方法模拟了带宽函数的卷积作用对调制光谱的影响,设定输入是 AoLP 为 0° 的完全线偏光,多级波片引入的光程差为 $21 \mu\text{m}$, 光谱仪光谱分辨率为 1.2 nm , 根据(11)式仿真得到的归一化光谱如图 3 所示。可以看出,在短波处 SM 频率较高,此时归一化信号的包络幅度降低较为严重,调制幅度下降了约 12% , 而长波处的调制幅度接近于 1.0 。文献[8]中定义了偏振效率(polarimetric efficiency)来表征光谱展宽对调制光谱的影响。由于光谱仪采样光谱是输入光谱中每个光谱分量对应的带宽函数的线性叠加,具有线

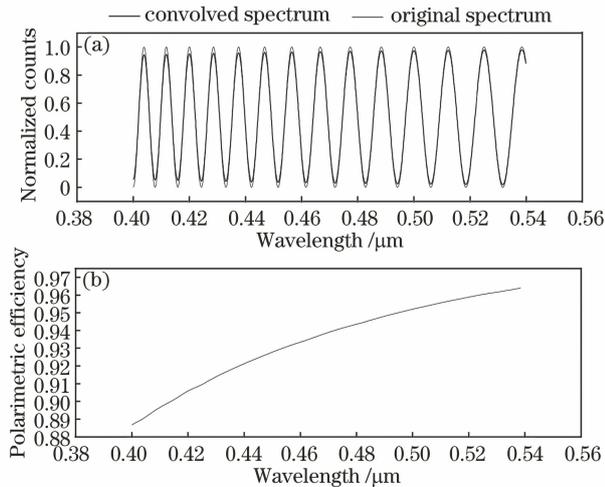


图 3 光谱展宽对调制光谱的影响。(a)原始调制光谱与卷积后的光谱对比;(b)偏振效率曲线

Fig. 3 Influence of spectral broadening on modulation spectrum. (a) Comparison of original modulation spectrum and convolved spectrum; (b) curve of polarimetric efficiency

性移不变性质,故当偏振 SM 模块的调制周期和光谱仪光谱分辨率确定后,系统偏振效率也会确定。

2.3 偏振信息解调方法

偏振信息解调是偏振 SM 技术的重要环节,对于单通道测量系统,常见的解调方法有傅里叶变换解调法。在傅里叶变换解调法中,先将调制光谱变换到傅里叶频域,再通过截取对应载波频率上的信息进行光谱复原。傅里叶变换解调法很大的缺陷在于原始光谱信号的高频成分(如吸收峰和特征谱线等)会和入射光的 Stokes 频谱发生混叠,形成通道间串扰,进而在复原光谱中引入较大的误差^[14]。另一种常见方法是代数解调法,其通过建立测量系统线性算子(矩阵)模型将输入偏振态映射到输出数据中,将采集调制光谱和系统矩阵的伪逆相乘从而求解出入射光的 Stokes 参量。该方法也存在一定的局限性,包括在系统线性算子定标过程中测试数据矩阵庞大、实验过程复杂和对定标光源偏振态的准确性要求过高^[15]。

由于所提方案是参照文献[16]中提出的双通道测量方式的,此时偏振分束器中出射的两正交光束的调制光谱正好相位相反,因此两正交光束相加可以得到入射光原始光谱。随后,对正交光谱做归一化处理,这样可以有效解决原始光谱信号对其他通道的串扰问题。在测量过程中,光学系统和电子学系统对两正交光波会存在响应差异^[17],用 $K_0(\lambda)$ 和 $K_{90}(\lambda)$ 分别表示水平分量和垂直分量的相对响应系数,二者表达式为

$$\begin{cases} I_{90}(\lambda) = K_{90}(\lambda)I_s(\lambda) \\ I_0(\lambda) = K_0(\lambda)I_p(\lambda) \end{cases}, \quad (13)$$

对双光束做归一化处理,可得到调制函数

$$M(\lambda) = \frac{I_{90}(\lambda) - \frac{K_{90}(\lambda)}{K_0(\lambda)}I_0(\lambda)}{I_{90}(\lambda) + \frac{K_{90}(\lambda)}{K_0(\lambda)}I_0(\lambda)} = P_L(\lambda) \cos \left\{ \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} \right] + 2\phi(\lambda) \right\}, \quad (14)$$

其中 $\frac{K_{90}(\lambda)}{K_0(\lambda)}$ 可通过无偏入射参考光求得^[18],即

$$\begin{cases} \frac{K_{90}}{K_0} = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \\ I_1(\lambda) = K_0 I(\lambda) / 2 \\ I_2(\lambda) = K_{90} I(\lambda) / 2 \end{cases} \quad (15)$$

由 2.2 节可知,在受到光谱展宽的影响后,实际归一化的功率谱为

$$M_{\text{real}}(\lambda) = W(\lambda) P_L(\lambda) \cos \left\{ \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} \right] + 2\phi(\lambda) \right\}, \quad (16)$$

式中: $W(\lambda)$ 为偏振效率。

$$M_{\text{real},1}(\lambda) = W(\lambda) \left\{ (q_0 + q_1\lambda) \cos \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} \right] - (u_0 + u_1\lambda) \sin \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} \right] \right\}, \quad (17)$$

式中: q_0 和 q_1 为 q 分量的截距和斜率; u_0 和 u_1 为 u 分量的截距和斜率。

应用最小二乘曲线拟合的方法可以求得一个 SM 周期内 DoLP 和 AoLP 信息, 拟合函数为

$$\chi^2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^N [M_{i_1} - M(\lambda_{i_1})]^2 \right\}, \quad (18)$$

式中: M_{i_1} 为实测值; N 为拟合点数。移动解调光谱窗口可获得整个工作谱段内的偏振信息, 此时

$$P'_{\lambda_k} = W(\lambda_k) \sqrt{(q_0 + q_1\lambda_k)^2 + (u_0 + u_1\lambda_k)^2}, \quad (19)$$

$$\phi_{\lambda_k} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{u_0 + u_1\lambda_k}{q_0 + q_1\lambda_k} \right), \quad (20)$$

式中: P'_{λ_k} 和 ϕ_{λ_k} 分别为中心波长处的解调 DoLP 及 AoLP。利用系统偏振效率对解调 DoLP 进行修正, 可得到实际 DoLP 为

$$P_{\lambda_k} = \frac{P'_{\lambda_k}}{W(\lambda_k)}. \quad (21)$$

3 验证实验

按照图 1 所示的 SM 偏振测量系统框图搭建实验光路。偏振光源包括卤钨灯、平行光管和偏振片。SM 模块中器件及关键参数如下。

1) 菲涅耳菱形棱镜

材料为 N-BK7, 工作波长为 400~1550 nm, 通过两次内部全反射可实现 90° 的相位差, 进而可提供相位延迟。由于相位差是由缓慢变化的棱镜色散产生的, 因此菲涅耳菱形棱镜中不同波长处的延迟量变化远小于其他器件。

2) 多级波片

由 1.2 mm 厚的石英晶体和 2.7 mm 厚的 MgF₂ 晶体以快轴正交的方式胶合而成。

3) 偏振片

工作波长为 350~650 nm, 消光比优于 1000。

实验中选用的光谱仪为荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec-ULS2048CL-EVO 系列光谱仪, 其工作波长范围为 300~800 nm, 光谱分辨率在 1.2 nm 左右。

在实际应用中, 若入射光的偏振态随波长变化较缓慢, 在一个 SM 周期内, 则认为线偏振光 Stokes 矢量随波长线性变化。此时(16)式可改写为

3.1 多级波片相位延迟量及系统偏振效率的标定

由 2.3 节可知, 要实现入射光偏振信息的解调, 需要已知多级波片的相位延迟量及系统的偏振效率。对多级波片而言, 延迟量误差来源主要包括: 1) 晶体双折射率的色散效应在每一个波长均不相同, 这就造成不同波长处的延迟量不一致, 故如果在整个 SM 波长范围内将色散值看作常量会引入相位延迟量的误差; 2) 波片厚度加工公差。上述的非理想因素均会造成多级波片设计相位延迟量和实测值之间的偏差。通过参考完全线偏振光的方法实现了对多级波片相位延迟量和系统偏振效率的标定。

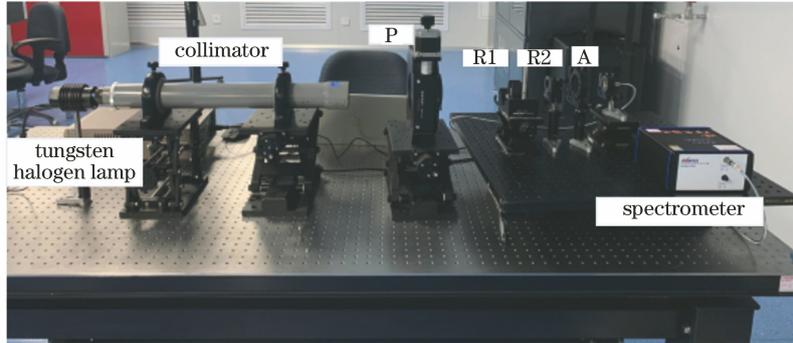
实验装置图如图 4 所示。将平行光管和卤钨灯作为光源, 并对 SM 模块进行装调。由于格兰-泰勒棱镜出射光的 AoLP 和棱镜基准侧面垂直, 因此将格兰-泰勒棱镜放置于参考水平面上。在棱镜出光面后放置参考偏振片 P, 利用硅光电二极管对偏振片出射光进行采集, 并利用高精度电机旋转偏振片。然后, 根据马吕斯定律对数据进行拟合找到参考偏振片通光轴与参考水平面垂直的位置, 此时的出射光即为 0° 线偏光。撤去格兰-泰勒棱镜, 在光路中加入检偏器 A 及光栅光谱仪, 旋转检偏器至检偏器后呈消光状态, 此时检偏器通光轴与参考偏振片垂直。接着, 放置菲涅耳菱形棱镜 R1, 并调整 R1 的快轴方位角使得快轴与偏振片 P 的通光轴平行。由于 0° 线偏光经过 R1 时线偏光的偏振态不发生改变, 故检偏器后仍是消光状态。最后, 加入多级波片 R2, 当 0° 完全线偏光经过多级波片时, 偏振信息会被调制到高频载波上, 通过旋转多级波片的快轴位置使得光谱仪的采样 SM 幅度尽可能达到最大。此时, 多级波片快轴与菲涅耳菱形棱镜快轴成 45° 角, 至此便完成了偏振 SM 模块各器件的相对角度装调。

转动起偏器 P 可产生 AoLP 已知的完全线偏光, 将该线偏光作为参考偏振光源, 经过 SM 模块后, 利用聚焦透镜将其会聚, 并利用光谱仪系统对其进行采集。以 10° 为步长, 旋转 P 可产生 18 种具有不同 AoLP 的参考偏振光。在每次测量中, 将检偏

器 A 分别旋转至 0° 和 90° 以模拟偏振分束棱镜的正交通道,在各通道下采集 50 次后取平均值,并扣除本底以用于后续数据处理。

利用理想非偏光对两正交通道相对响应系数进

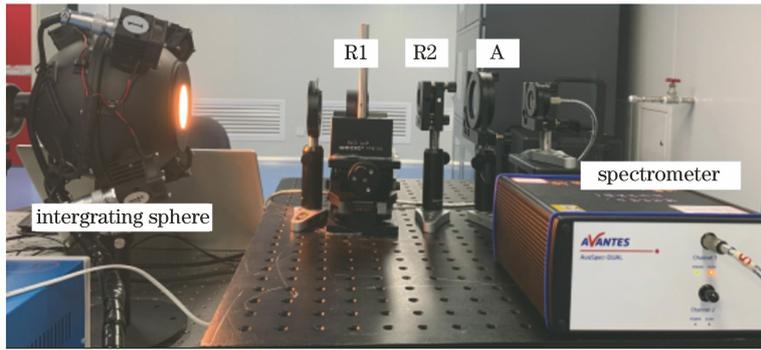
行标定,定标光源采用卤钨灯积分球光源,实验现场如图 5 所示。调整合适的光谱仪积分时间以采集数据,两通道的光谱曲线数字化(digital number, DN)值如图 6 所示。



P: polarizer; A: analyser; R1: Fresnel rhomb; R2: multiple-order wave plate

图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up



A: analyser; R1: Fresnel rhomb; R2: multiple-order wave plate

图 5 相对响应系数定标现场

Fig. 5 Calibration site of relative response coefficient

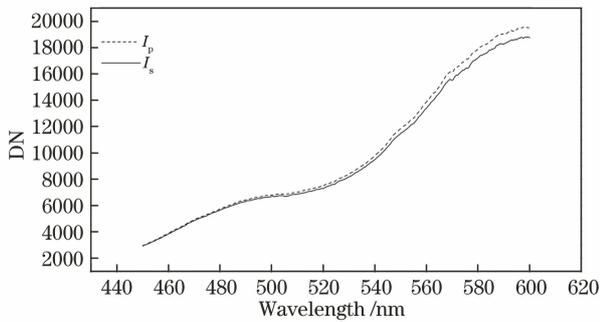


图 6 双通道非偏光光谱

Fig. 6 Spectra of dual-channel unpolarized light

3.1.1 多级波片延迟量的标定

旋转偏振片 P 至某一固定 AoLP ϕ_n 处,此时 SM 模块中的入射光为完全线偏光,调制函数为

$$M_1(\lambda) = W_n(\lambda) \cos \left[\frac{2\pi\delta(\lambda)}{\lambda} + 2\phi_n \right], \quad (22)$$

式中: $W_n(\lambda)$ 表示偏振效率。

多级波片的实际延迟量为

$$\delta_{\text{real}}(\lambda) = \delta_0(\lambda) + \sum_{i_2=0}^4 a_{i_2} \lambda^{i_2}, \quad (23)$$

式中: $\delta_0(\lambda)$ 为多级波片延迟量设计值; a_{i_2} 为修正系数; i_2 为多项式指数。在实验系统中,多级波片由石英晶体和 MgF_2 晶体以快轴正交的方式胶合而成,根据文献[19]中的晶体色散公式可知,延迟量设计值为

$$\begin{aligned} \delta_0(\lambda) = & 0.0077 \times (e^{-\lambda/0.13328} + 0.01168) \times \\ & d_1 - 0.01827 \times (e^{-\lambda/0.12096} + 0.00887) \times d_2, \end{aligned} \quad (24)$$

式中: d_1 和 d_2 分别为石英晶体和 MgF_2 晶体的厚度。

由(21)式可知,系统偏振效率是调制函数的包络线。首先,利用寻峰算法找到实测调制函数的极大值点,利用分段三次样条插值法求得偏振效率 $W_n(\lambda)$ 。然后,在整个解调波段内进行非线性最小二乘拟合以求解出修正系数值。由于卤钨灯光源在

短波处能量较弱,且信噪比较小,故选用 450~600 nm 波段进行拟合。以 0°参考偏振光为例,两正交通道经相对响应系数校正后的 s 光和 p 光光谱如图 7 所示。归一化数据拟合结果如图 8 所示。

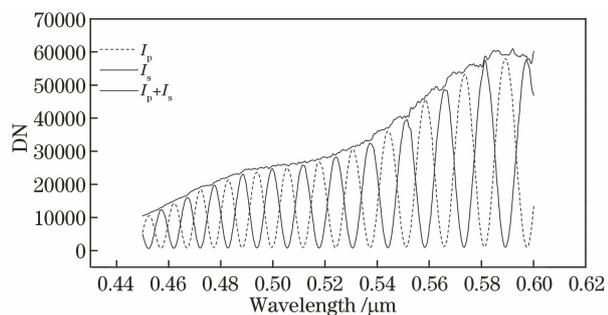


图 7 0°参考线偏振光的原始光谱

Fig. 7 Original spectrum of 0° reference linear polarized light

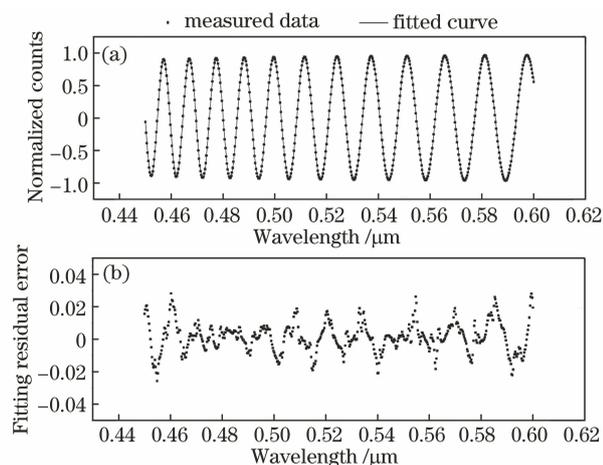


图 8 0°参考线偏振光的调制函数和拟合残差。

(a) 调制函数;(b)拟合残差

Fig. 8 Modulation function of 0° reference linear polarized light. (a) Modulation function; (b) fitting residual error

在具有不同 AoLP 的参考线偏光入射情况下,将拟合求得的修正系数代入(22)式以计算出多级波片的实际延迟量,实测值和理论设计值如图 9 所示。

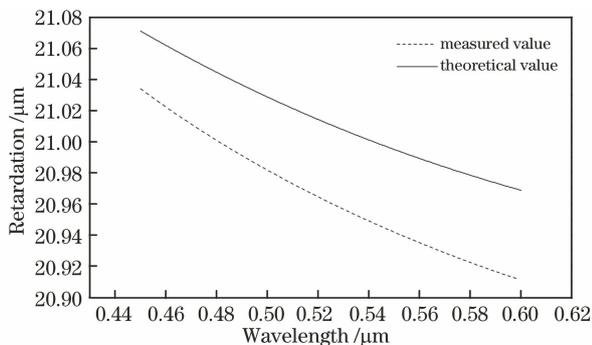


图 9 多级波片的延迟量

Fig. 9 Retardation of multiple-order wave plate

3.1.2 偏振效率标定

系统偏振效率会影响入射光 DoLP 的解调精度,为了抑制噪声干扰并得到精度更高的偏振效率函数,利用实测调制函数曲线分周期进行最小二乘曲线拟合以实现偏振效率的求解。在(21)式中,多级波片相位延迟量在经过标定后变为已知量,在一个调制周期内,可以认为偏振效率曲线随波长线性变化。通过一定的步长移动解调中心波长值,根据(10)式获取一个解调周期,对数据进行拟合求得对应中心波长处的偏振效率,求解方法如 2.3 节所示。图 10 是 0°参考线偏光对应的偏振效率曲线。在具有不同 AoLP 的参考线偏光入射下求得系统的平均偏振效率,如图 11 所示。

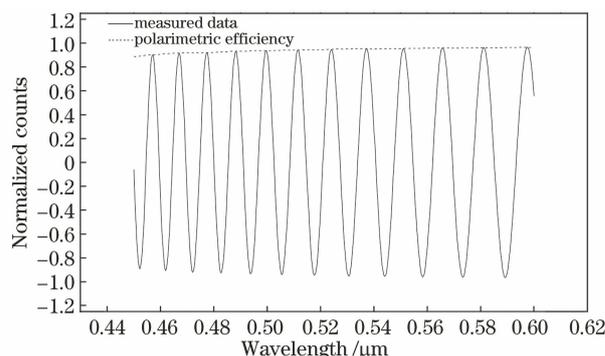


图 10 0°参考线偏光的偏振效率

Fig. 10 Polarimetric efficiency of 0° reference linear polarized light

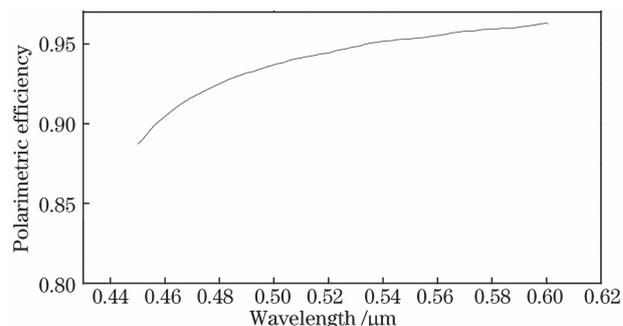


图 11 系统偏振效率

Fig. 11 Polarimetric efficiency of system

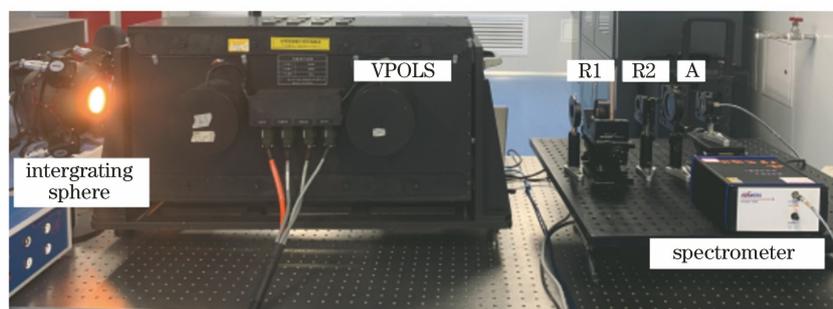
3.2 基于可调偏振度光源的验证实验

可调偏振度光源(variable polarization light source, VPOLS)是一种部分偏振光发生器,由卤钨灯积分球及偏振态调节器组成。偏振调节器中有由两块康宁 7979 平板玻璃组成的玻璃片堆,利用高精度电机控制玻璃片堆中平板的旋转角度,根据菲涅耳反射原理,出射光 DoLP 由玻璃折射率及平板玻璃间的相对角度决定,理论 DoLP 计算方法可以参考文献[20]。该可调偏振度光源可以提供 200~

4000 nm(紫外到红外)的工作光谱范围,DoLP 可调范围为 0~0.3,偏振精度优于 0.05%。需要注意的是,VPOLS 的入射光一定为非偏光源,并且玻璃的色散效应会造成玻璃片堆在同一旋转角度下不同波长处的 DoLP 不同。

系统偏振测量精度验证实验现场如图 12 所示。将卤钨灯积分球作为可调偏振度源的输入,设定水平方向为光轴方向,可调偏振度源的开口限制了视

场角,积分球入射光近似于平行入射。调节可调偏振度源中玻璃片堆的角度,以获取不同 DoLP 入射的部分线偏光。利用测量系统对标准线偏光进行测量,在每个入射光偏振态下采样 50 次,并且在扣除本底后进行解调,进而计算出测量 DoLP 值与理论值间的绝对偏差。当设定玻璃片堆的旋转角度为 51°,出射光的 AoLP 为 45°时,解调结果如图 13 所示。



A: analyser; R1: Fresnel rhomb; R2: multiple-order wave plate

图 12 系统偏振测量精度验证实验现场

Fig. 12 Experiment site for polarization measurement accuracy verification of system

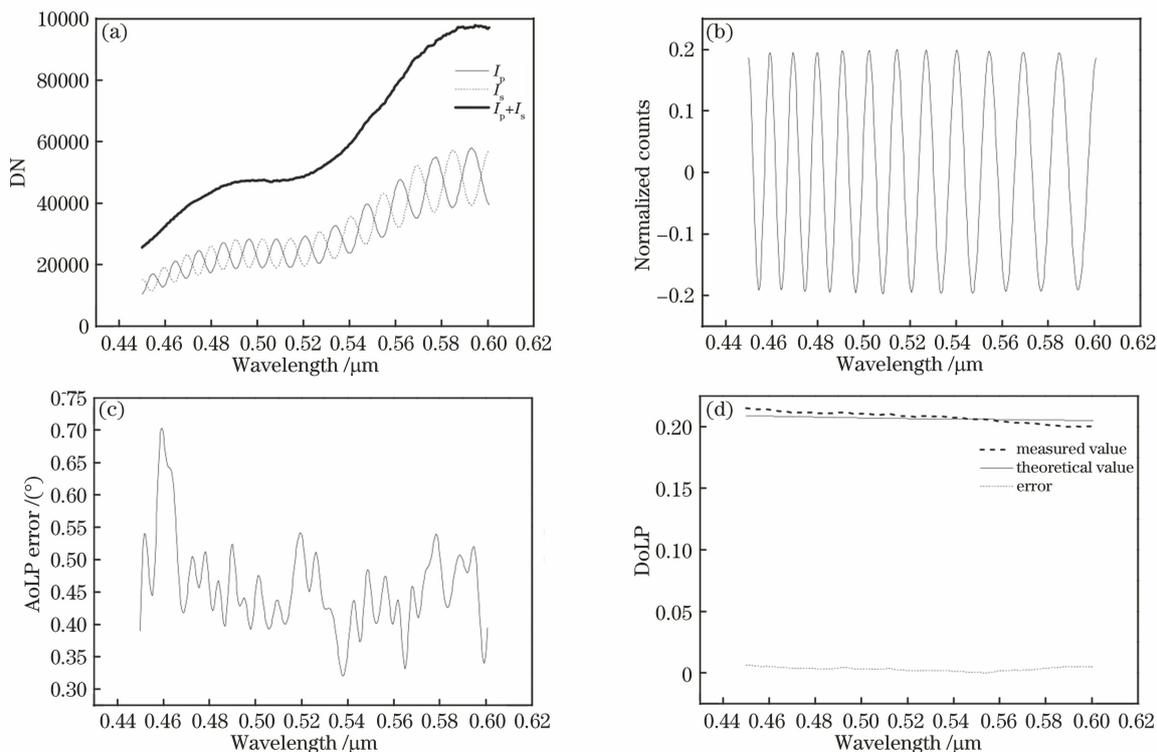


图 13 VPOLS 的理论输出与测量结果。(a)原始光谱;(b)调制函数;(c) AoLP 测量误差;(d) DoLP 测量值及其误差

Fig. 13 Theoretical outputs and measurement results of VPOLS. (a) Original spectra; (b) modulation function; (c) measurement error of AoLP; (d) measurement value of DoLP and its error

图 14、15 是当可调偏振度光源偏振调节器旋转角度分别为 38.3°和 59.0°,AoLP 为 45°时,每个角度下光源输出的标准 DoLP 和 AoLP 与测量解调值之间的绝对差值的结果。

在解调波长内,统计玻璃片堆各旋转角度下理论 DoLP 和 AoLP 与解调值之间的最大偏差,如表 1 所示。可以看出,当玻璃片堆旋转至 59.0°时,DoLP 的最大误差为 1.11%,其余各角度下偏差均

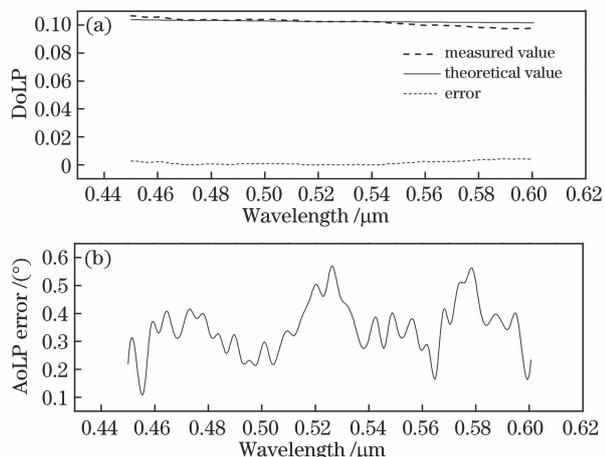


图 14 VPOLS 旋转角度为 38.3° 时的测量结果。(a) DoLP 随波长的变化;(b) AoLP 误差随波长的变化

Fig. 14 Measurement results when VPOLS rotation angle is 38.3° . (a) DoLP varying with wavelength; (b) AoLP error varying with wavelength

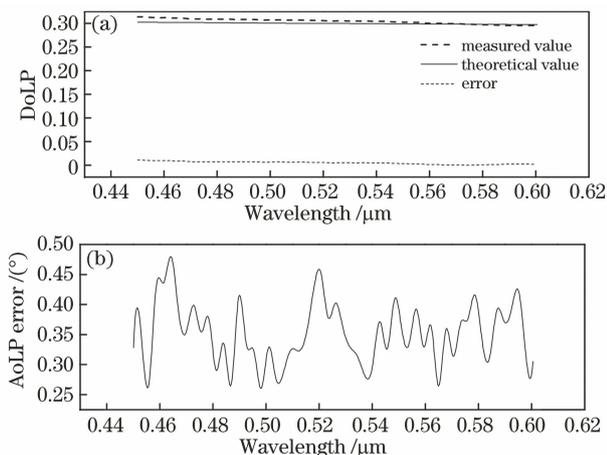


图 15 VPOLS 旋转角度为 59.0° 时的测量结果。(a) DoLP 随波长的变化;(b) AoLP 误差随波长的变化

Fig. 15 Measurement results when VPOLS rotation angle is 59.0° . (a) DoLP varying with wavelength; (b) AoLP error varying with wavelength

表 1 测量结果与理论值的偏差统计

Table 1 Error statistics between measured value and theoretical value

Rotation angle / ($^\circ$)	Maximum of DoLP error / %	Maximum of AoLP error / ($^\circ$)
38.3	0.282	0.57
51.0	0.622	0.70
59.0	1.110	0.48

在 1% 以内, AoLP 偏差均在 0.7° 以内, 表明测量结果与理论值具有较好的一致性。

4 结 论

介绍了 SM 偏振测量技术的基本原理, 推导了调制公式, 并详细阐述了双通道偏振解调方法。根据测量原理搭建了实验室测试系统, 并完成了对系统重要参数的标定及偏振测量精度的验证。实验结果表明, 所提偏振测量系统具有较高的偏振测量精度。在实验过程中, 调制模块中偏振元器件本身的非理想、器件装调角度偏差等都会引入偏振测量误差。因此, 要想进一步提高系统偏振测量精度, 需要建立偏振测量的误差模型, 并通过偏振定标方法对测量结果进行修正, 该内容是下一步需要进行的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Kim J, Escuti M J. Snapshot imaging spectropolarimeter utilizing polarization gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7086: 708603.
- [2] Dai H, Li D M, Li J P, et al. Modulated polarization imaging technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 062602.
代虎, 李丹明, 李居平, 等. 调制型偏振成像技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 062602.
- [3] Wang X Q, Xiangli B, Huang M, et al. Advance in imaging spectropolarimeter [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7): 1968-1974.
王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 成像光谱偏振仪研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1968-1974.
- [4] Liu J, Li J X, Bai C X, et al. Theory and method of Fourier transform hyperspectral Mueller matrix imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711004.
刘杰, 李建欣, 柏财勋, 等. 傅里叶变换高光谱 Mueller 矩阵成像理论与方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711004.
- [5] Oka K, Kato T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. Optics Letters, 1999, 24(21): 1475-1477.
- [6] Iannarilli F J, Jr, Jones S H, Scott H E, et al. Polarimetric-spectral intensity modulation (P-SIM): enabling simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3698: 474-481.
- [7] Snik F, Karalidi T, Keller C U. Spectral modulation for full linear polarimetry [J]. Applied Optics, 2009, 48(7): 1337-1346.
- [8] van Harten G, Snik F, Rietjens J H H, et al. Prototyping for the Spectropolarimeter for Planetary

- EXploration (SPEX): calibration and sky measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8160: 330-341.
- [9] Wang X Q, Xiang L B, Huang M, et al. Study and simulation of the intensity modulation-Fourier transform spectropolarimeter [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7): 1980-1984.
王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 强度调制-傅里叶变换光谱偏振技术研究及仿真 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1980-1984.
- [10] Song Z P, Hong J, Qiao Y L. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2325-2331.
宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪的系统设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2325-2331.
- [11] Zhao J, Zhou F, Li H, et al. Research on new type of spectral modulation polarization measurement technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(10): 2906-2910.
赵佳, 周峰, 李欢, 等. 新型光谱调制偏振测量技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(10): 2906-2910.
- [12] Mao J J. Research on key technologies of visible-near infrared micro-spectrometer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 39-45.
毛京京. 可见光-近红外微型光谱仪关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 39-45.
- [13] Dong Y H, Cen S Y. Improving spectrograph accuracy by Bayesian method [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1491-1495.
董宇航, 岑松原. 利用贝叶斯方法提高光谱仪的测量准确度 [J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1491-1495.
- [14] Lee D J, LaCasse C F, Craven J M. Channeled spectropolarimetry using iterative reconstruction [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9853: 240-253.
- [15] Sabatke D, Locke A, Dereniak E, et al. Linear calibration and reconstruction techniques for channeled spectropolarimetry [J]. Optics Express, 2003, 11(22): 2940-2952.
- [16] Craven J, Kudenov M W. False signature reduction in channeled spectropolarimetry [J]. Optical Engineering, 2010, 49(5): 053602.
- [17] Song M X, Sun B, Sun X B, 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定标 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1153-1158.
- [18] Quan N C, You C Y, Zhang C M, et al. Channeled spectropolarimetry with increased bandwidth and aliasing reduction [J]. Optik, 2019, 181: 562-570.
- [19] Yue Z Y, Wu F Q, Sun D, et al. Analysis of retardation dispersion for phase retarders in birefringent crystals [J]. Optical Technique, 2015, 41(5): 467-470.
岳增友, 吴福全, 孙丹, 等. 双折射晶体相位延迟片的延迟量色散性分析 [J]. 光学技术, 2015, 41(5): 467-470.
- [20] Tao F. Study on error analysis and system test for the polarized scanning atmospheric corrector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
陶菲. 大气校正偏振扫描仪的测量误差与系统检测方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.