

文章编号 1004-924X(2017)02-0325-09

分时偏振光谱测量系统的起偏效应校正

张海洋^{1,2}, 李 颀^{1,2}, 颜昌翔¹, 张军强^{1*}

(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)

摘要:针对实验室偏振光谱测量系统短波红外起偏效应大、测量偏差大的问题,建立了系统目标斯托克斯校正模型,提出了该模型中相关系数的测量方法,从而实现了系统偏振效应的精密校正。首先分析了实验室常用的低成本分时偏振光谱测量系统存在的主要问题及起偏效应的来源。然后根据偏振传输理论,将系统中起偏效应较大的波谱仪等效为检偏系统,建立了目标偏振信息的校正模型,并通过与理想模型的对比较验证了模型的正确性。最后针对本测量设备,为提高校正系数的测量精度,在解析法的基础上提出了一种更精确的拟合法。实验结果表明,本方法的校正精度高于 0.5%,满足实验室中对目标偏振信息处理的精度要求,对偏振光谱测量系统的研制和标定具有指导意义。

关键词:偏振遥感;偏振光谱;起偏效应校正;偏振传输理论;相关系数;ASD 光谱仪

中图分类号:O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0325

Calibration of polarized effect for time-divided polarization spectral measurement system

ZHANG Hai-yang^{1,2}, LI Yi^{1,2}, YAN Chang-xiang¹, ZHANG Jun-qiang^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: zjq1981_81@163.com*

Abstract: Aiming at the problems of polarizing effect in short wave infrared and measurement deviation in the polarization spectral measurement system built in lab, a system calibration model was established and a method to measure the correction coefficients of the model was proposed, thus the polarizing effect was calibrated precisely. Firstly, the main problem of the regular time-divided polarization spectral measurement system was described and the origin of the polarizing effect was analyzed. An ASD spectrometer which had a serious polarizing effect functioned as an analyzer according to the polarization transmission theory. Thereby a system calibration model was established and verified by comparing with the ideal model widely used. Then, a high precision fitting method of the correction coefficients was proposed for improving the measurement accuracy based on the analytical method. Experimental results indicate that the calibration precision is higher than 0.5%, which can fully satis-

收稿日期:2016-06-01;修订日期:2016-07-22.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A103);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61505199)

fy the requirements of target polarization information processing in laboratory. This method has a great significance for the development and calibration of polarization spectra measurement system.

Key words: polarization remote sensing; polarization spectra; polarizing effect calibration; polarization transmission theory; correction coefficient; ASD spectrometer

1 引言

偏振是光波的基本属性,它携带了丰富的目标信息^[1]。相比于传统的遥感探测,偏振探测具有凸显目标^[2]、辨别真伪^[3]、分类识别、反演目标表面的理化及纹理性质^[4]等特点,因此在农业、军事、资源环境^[5-6]等方面都有非常重要的应用价值。

随着偏振探测在目标识别、反演中应用的日益广泛,高精度低成本的偏振光谱测量系统成为迫切需求。该系统广泛用于实验室测量目标的偏振光谱信息^[7]和建立偏振光谱数据库并构建反演模型^[8]。在各种偏振探测系统中,分时测量是成本最低且最简便易行的测量方案,虽然有实时性差等缺点,但对实验室测量的影响较小。

为获取目标的偏振光谱信息,需要在偏振片后加入光谱仪系统。而目前大部分光谱仪系统均存在着一定的起偏效应^[9],严重影响偏振测量精度。本文针对实验室搭建的偏振光谱测量系统短波红外起偏效应较大、偏振测量精度较差的情况,分析了系统起偏的原因,建立了目标斯托克斯矢量的校正模型,并提出了模型中校正系数及相关参数的高精度测量方法。通过实验验证,该方法可以准确地校正由 ASD 波谱仪系统引起的起偏效应,偏振校正精度高于 0.5%,满足对目标偏振信息处理的要求,对偏振光谱测量系统的研制具有重要意义。

2 分时偏振光谱测量系统分析

2.1 系统介绍及主要问题

偏振测量系统的基本结构有分时测量、分振幅、分孔径、分焦平面^[10]等。其中分时测量虽实时性较差,但成本最低且易与常用的光学系统整合,非常适合于静态目标的偏振特性实验室测量。

简单的分时偏振光谱测量系统可直接将旋转偏振片置于光谱仪镜头的入瞳处,并使用无偏光

源照明样品即可实现。其中,光谱仪镜头的视场应尽量小,以降低由视场角引起的起偏效应;照明系统与探测系统的光轴要严格重合,以避免非正入射引起的起偏效应。通过测量两组相互垂直方向($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$)的偏振光强,即可得到目标的偏振信息。该系统如图 1 所示。

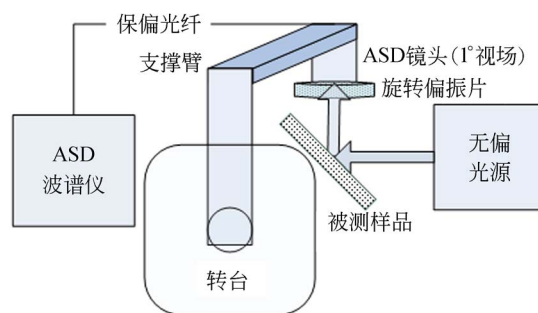


图 1 多角度偏振光谱测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-angle polarization spectral measurement system

偏振光谱测量系统本身的起偏效应会严重影响偏振测量精度,因此在系统设计时,要选用低起偏的光学系统结构并进行优化,以最大程度地降低起偏性。在实际应用中,由于专门定制的光谱仪系统价格较高,为控制成本,一般直接采购诸如 ASD 地物波谱仪等成熟产品。虽然这类产品在光谱探测方面非常优秀,但系统设计时并未将起偏效应^[11]作为重点优化参数。

图 2 为该系统对无偏光源的偏振度及偏振分量光强的测量结果。从图中可知:(1)测量结果分三段跳变,各分段内连续;(2)可见-近红外波段(Visible Near Infrared, VNIR)的偏振度很低且变化平缓,各偏振分量的光强基本相同;(3)短波红外(Short Wave Infrared, SWIR)部分偏振度变化剧烈且数值较高,各偏振分量的光强有较大差异;(4)1 375 nm 附近的偏振度与可见-近红外波段的相近,且此处各偏振分量光强基本相同。根据偏振理论,无偏光源所用的卤钨灯在可见-短波红外范围内的偏振度整体变化平缓且数值较低(随波长增加略有上升),各偏振分量的光强在探

测波段内也基本相同。由此可知,该偏振光谱测量系统在可见-近红外波段的精度较高,而短波红外的精度较差,需要进行分析校正。

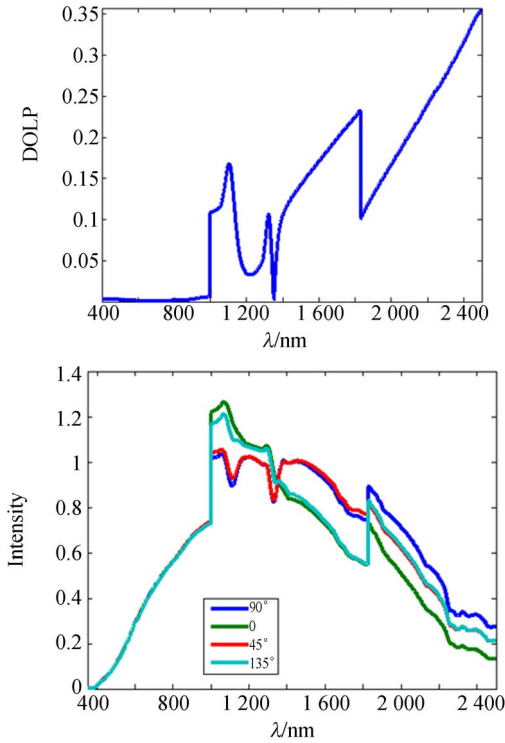


图 2 无偏光源的偏振度及偏振分量的测量结果
Fig. 2 Measurement of Degree of Linear Polarization (DOLP) and polarized component of unpolarized light

2.2 机理分析

本偏振光谱测量系统的探测波段为 350~2 500 nm,系统起偏效应跟波段明显相关,可见-近红外波段起偏度低,短波红外部分起偏度较高,且各波段间有剧烈跳变。考虑到光学镜片的起偏效应均为随波长渐变,不会发生跳变及剧烈变化,而测量系统中分波段的只有 ASD 地物波谱仪的光栅与探测器,因此系统起偏效应主要由 ASD 波谱仪引起。其影响因探测波段不同而分为三部分^[11]:可见-近红外部分(VNIR:350~1 000 nm),采用光束小角度入射固定全息光栅,并采用 512 pixel 的线阵探测器进行光谱维的能量接收;两个短波红外部分(SWIR1:1 000~1 800 nm,SWIR 2:1 800~2 500 nm),均采用光束入射快速旋转的全息光栅,并采用单像元 InGaAs 制冷探测器,通过快速旋转光栅实现光谱维的能量接

收。其色散结构^[11]如图 3 所示。

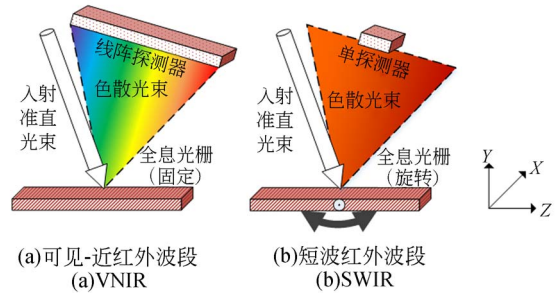


图 3 ASD 波谱仪系统色散结构示意图

Fig. 3 Dispersive structures of ASD spectrometer

全息光栅的光栅方程如下^[12]:

$$d(\sin \varphi \pm \sin \alpha) = m\lambda, m=0, \pm 1, \quad (1)$$

式中: φ, α 分别表示入射角与衍射角。如图 3(a)所示,对于 VNIR 波段,入射角较小且固定,ASD 波谱仪的起偏效应主要由衍射角引起,不过从图 2(a)可知,衍射角影响较小,起偏度先下降后上升。由于中心波长 675 nm 处的衍射角最小,根据偏振理论,此时的起偏度也最低。如图 3(b)所示,对 SWIR 波段,由于光栅旋转导致不同波长的入射角不同,衍射角也相应变化,此时系统的起偏效应由入射角与衍射角共同引起,且入射角的影响为主。其中 SWIR1 波段的中心波长 1 352 nm 处,入射角最小,此时的起偏度最低,由图 2(a)可以看出,该值接近可见光的起偏度。

从以上分析可知,偏振光谱测量系统的起偏效应主要由 ASD 波谱仪引起,起偏效应随波长的变化对应光栅的入射角或衍射角变化,而波长与入射角、衍射角的对应关系是固定不变的,属于系统效应。若短波红外波段采用如可见-近红外波段的固定光栅加线阵探测器形式,则可极大地降低该起偏效应。但由于两个短波红外线阵制冷探测器的成本已经远超出普通 ASD 波谱仪的价格,故最可行的方案仍是采用系统定标法。

3 ASD 波谱仪起偏效应校正

3.1 基于偏振传输理论的起偏效应校正模型

由于本 ASD 波谱仪具有一定的起偏性,类似于偏振理论对检偏系统的描述,可设其偏振角度为 $\theta_2(\lambda)$,消光比为 $\epsilon_2^2(\lambda) = R_s/R_p$,其中 R_s, R_p 表示两个正交分量光强的反射率。ASD 波谱仪本

身已经过辐射定标,其最大透过率为 1。反射式光学系统各位置的穆勒矩阵^[13]为(忽略圆偏振分量,下同):

$$\mathbf{M}_R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_S + R_P & R_S - R_P & 0 \\ R_S - R_P & R_S + R_P & 0 \\ 0 & 0 & -2\sqrt{R_S R_P} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_{ASD}(\theta_2, \epsilon_2^2, \lambda) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon_2^2 & (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2^2)\sin 2\theta_2 \\ (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2^2)\cos^2 2\theta_2 + 2\epsilon_2\sin^2 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 \\ (1 - \epsilon_2^2)\sin 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \sin^2 2\theta_2 + 2\epsilon_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将偏振测量系统中旋转偏振片的穆勒矩阵用 $\mathbf{M}_p(\theta)$ 表示,则系统的偏振传输过程如图 4 所示。

当目标反射光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_m = [\mathbf{I} \ \mathbf{Q} \ \mathbf{U}]^T$ 时,到达光谱仪探测器的光束斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_{ASD}(\theta_2, \epsilon_2^2, \lambda) \times \mathbf{M}_p(\theta) \times \mathbf{S}_m. \quad (5)$$

将 ASD 波谱仪及线偏振片的穆勒矩阵^[13]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{out} \\ \mathbf{Q}_{out} \\ \mathbf{U}_{out} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon_2^2 & (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2^2)\sin 2\theta_2 \\ (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2^2)\cos^2 2\theta_2 + 2\epsilon_2\sin^2 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 \\ (1 - \epsilon_2^2)\sin 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 & (1 - \epsilon_2)^2 \sin^2 2\theta_2 + 2\epsilon_2 \end{bmatrix} \times \frac{t_x^2}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & (1 - \epsilon^2)\cos 2\theta & (1 - \epsilon^2)\sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2)\cos 2\theta & (1 - \epsilon^2)\cos^2 2\theta + 2\epsilon\sin^2 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta \\ (1 - \epsilon^2)\sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \cos 2\theta \sin 2\theta & (1 - \epsilon)^2 \sin^2 2\theta + 2\epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $t_x^2, \theta, \epsilon^2$ 分别表示旋转线偏振片的最大透过率、通光轴角度及消光比^[14]。由于该旋转偏振片的消光比高于 1:300(近红外波段优于 1:10³),

$$\mathbf{I}_{out} = \frac{t_x^2}{4} \{ (\mathbf{I} + \mathbf{Q}\cos 2\theta + \mathbf{U}\sin 2\theta) [(1 + \epsilon_2^2) + (1 - \epsilon_2^2)\cos 2(\theta_2 - \theta)] \}. \quad (7)$$

当采用(0°, 90°, 45°, 135°)四偏振角度组合进行偏振测量时,将 θ 分别代入 0°, 90°, 45°, 135°, 即可得到对应偏振角度的光强 $\mathbf{I}_{(0)}, \mathbf{I}_{(90)}, \mathbf{I}_{(45)}$,

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= \frac{2[(1 + \epsilon_2^2)(\mathbf{I}_{(0)} + \mathbf{I}_{(90)}) - (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2(\mathbf{I}_{(0)} - \mathbf{I}_{(90)})]}{t_x^2[(1 + \epsilon_2^2)^2 - \cos^2 2\theta_2(1 - \epsilon_2^2)^2]} \\ \mathbf{Q} &= \frac{2[(1 + \epsilon_2^2)(\mathbf{I}_{(0)} - \mathbf{I}_{(90)}) - (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2(\mathbf{I}_{(0)} + \mathbf{I}_{(90)})]}{t_x^2[(1 + \epsilon_2^2)^2 - \cos^2 2\theta_2(1 - \epsilon_2^2)^2]}, \\ \mathbf{U} &= \frac{2[(1 + \epsilon_2^2)(\mathbf{I}_{(45)} - \mathbf{I}_{(135)}) - (1 - \epsilon_2^2)\cos 2\theta_2(\mathbf{I}_{(45)} + \mathbf{I}_{(135)})]}{t_x^2[(1 + \epsilon_2^2)^2 - \sin^2 2\theta_2(1 - \epsilon_2^2)^2]} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:等效偏振系数 $\epsilon_2^2(\lambda), \theta_2(\lambda)$ 、测量系统参数

用消光比 ϵ_2^2 可表示为:

$$\mathbf{M}_R = \frac{R_S + R_P}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 - 2\epsilon_2^2 & 0 \\ 1 - 2\epsilon_2^2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2\epsilon_2}{1 + \epsilon_2^2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于起偏性具有方向性,故两边各乘旋转矩阵 $\mathbf{R}(\theta_2)$ ^[13],从而得到该系统的穆勒矩阵为:

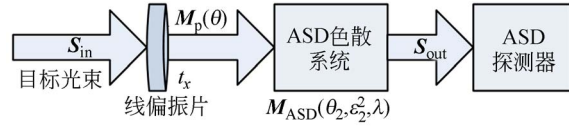


图 4 偏振传输理论示意图

Fig. 4 Principle diagram of polarization transmission

$\mathbf{M}_{ASD}, \mathbf{M}_p(\theta)$ 展开后得:

为简化运算,可近似认为是具有一定透过率的理想线偏振片,其消光比 $\epsilon^2 = 1 : +\infty$ 。则到达光谱仪探测器的光强为:

$\mathbf{I}_{(135)}$,从而构建出 3 个包含目标斯托克斯参量 $\mathbf{I}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}$ 的联立方程组。求解该方程组,即可得到目标斯托克斯矢量的简化校正模型:

$t_x^2(\lambda)$ 为校正系数。由此即可得到校正后目标的

斯托克斯矢量,进而求得目标的真实偏振度及偏振相角。当 ASD 波谱仪为不起偏系统且线偏振片的最大透过率为 1 时,目标的斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{(0)} + \mathbf{I}_{(90)}, \mathbf{Q} = \mathbf{I}_{(0)} - \mathbf{I}_{(90)}, \mathbf{U} = \mathbf{I}_{(45)} - \mathbf{I}_{(135)}. \quad (9)$$

该表达式同目前无校正的目标斯托克斯矢量的表达式^[15](即理想模型)相同,从而验证了本理论模型的正确性。根据偏振度、偏振相角与斯托克斯矢量的关系^[15]可知,在测量系统线偏振片消光比近似为理想的前提下,只要得到 ASD 波谱仪的等效消光比 ϵ_2^2 及偏振角度 θ_2 即可得到目标准确的偏振度和偏振相角;若再得到线偏振片的最大透过率 t_x^2 ,即可得到目标准确的斯托克斯矢量。由于 ASD 波谱仪对光强的测量精度较高,校正精度仅受等效偏振系数及线偏振片最大透过率的测量精度限制。

3.2 解析法获取校正系数

本文采用无偏光源正入射偏振光谱测量系统,通过旋转线偏振片得到不同偏振方向的线偏振光,从而获得多个包含校正系数 $\epsilon_2^2(\lambda)$, $\theta_2(\lambda)$, $t_x^2(\lambda)$ 的方程,进而求得穆勒矩阵中的等效偏振系数 ϵ_2^2 , θ_2 及测量系统参数 t_x^2 。为简化测量,采用 $(0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ)$ 4 个偏振角度的线偏振光,系统如图 5 所示。

当准确得到对应各偏振角度的光强后,即可得到等效偏振角度、等效消光比以及线偏振片的最大透过率。其精度取决于偏振片旋转角度的控制精度及各偏振角度下光强的测量精度。虽然该解析法的数据采集量极少,但由于解析式中含有反正切函数,测量结果对噪声极其敏感,现有实验室条件下很难保证校正精度。

3.3 拟合法获取校正系数

仍利用该校正系数测量装置,由式(10)可知,当线偏振片的通光轴角度在 $[0, 2\pi]$ 内连续变化时,到达探测器的光强呈余弦变化,光强随旋转角度 θ 变化的回归模型为:

$$I' = A[(1-C)\cos 2(B-\theta) + (1+C)], \quad (12)$$

式中: $A = t_x^2 I_0 / 4$, $B = \theta_2$, $C = \epsilon_2^2$ 。对各波长的光强变化进行最小二乘拟合,虽然波长范围较大,逐

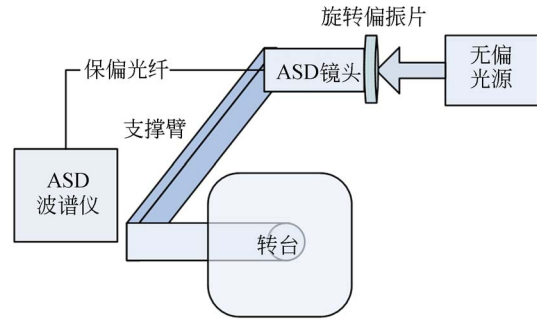


图 5 偏振光谱探测系统自校正模式

Fig. 5 Self-correction mode of polarization spectral measurement system

设正入射至偏振片的是强度为 I_0 的无偏光,即 $\mathbf{S}_n = [I_0 \ 0 \ 0]^T$ 。根据式(5),到达 ASD 波谱仪探测器的光强为:

$$I'_{\text{out}} = \frac{t_x^2 I_0}{4} [(1 + \epsilon_2^2) + (1 - \epsilon_2^2) \cos 2(\theta_2 - \theta)]. \quad (10)$$

将 θ 分别代入 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$, 即可得到对应偏振角度的光强 $I'_{(0)}$, $I'_{(90)}$, $I'_{(45)}$, $I'_{(135)}$, 由此即可得到校正系数的解析式为:

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \text{atan} \left(\frac{I'_{(45)} - I'_{(135)}}{I'_{(0)} - I'_{(90)}} \right), \epsilon_2^2 = \frac{(I'_{(0)} + I'_{(90)}) \cos 2\theta_2 - (I'_{(0)} - I'_{(90)})}{(I'_{(0)} - I'_{(90)}) + (I'_{(0)} + I'_{(90)}) \cos 2\theta_2}, t_x^2 = \frac{I'_{(0)} + I'_{(90)}}{1 + \epsilon_2^2} \quad (11)$$

波长拟合次数较多,但模型简单,拟合速度较快 (< 0.3 秒/次)。

为避免过拟合,需设置合理的初值及范围。由式(10)可知,当 $\theta \approx \theta_2$ 或 $\theta_2 + \pi$ 时,最大光强 $I'_{\text{max}} = t_x^2 I_0 / 2$; 当 $\theta \approx \theta_2 - \pi/2$ 或 $\theta_2 - 3\pi/2$ 时,最小光强 $I'_{\text{min}} = \epsilon_2^2 t_x^2 I_0 / 2$ 。由此得到各拟合系数的初值如下: $\epsilon_2^2 = I'_{\text{min}} / I'_{\text{max}}$, $t_x^2 = 2 I'_{\text{max}} / I_0$, $\theta_2 = \theta(I'_{\text{max}})$ 。由于本 ASD 波谱仪可见-近红外起偏效应很低,短波红外起偏效应较高,则对应拟合系数范围: $A \in (0, t_x^2 I_0 / 4]$, $B \in [0, \pi]$, $C \in (0, 1)$ 且 $C_{\text{VNIR}} \approx 1$, $C_{\text{SWIR}} < 1$ 。由此即可精确得到拟合系数 $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $C(\lambda)$ 。由各拟合系数的物理意义得到: $t_x^2 = 4A(\lambda) / I_0$, $\theta_2 = B(\lambda)$, $\epsilon_2^2 = C(\lambda)$ 。

通过该方法即可精确得到校正模型中的各校正系数。为提高拟合精度,设置的角度个数要充

足,且角度定位准确。本系统中采用 Newport 公司的精密压电马达旋转台,角度旋转精度为 0.08° ,最小旋转角度为 0.001° ,完全满足参数精确测量的要求。

该方法对装置的要求简单,且一次测量就可得到所有波长的校正系数。校正系数的精度由入射无偏光源的偏振度、线偏振片的消光比以及 ASD 探测精度决定。由于本系统所用无偏光源的偏振度约为 0.3% (随波长增加略有上升),经稳压电源控制后的不稳定性低于 0.16% (实测 2 h 内),线偏振片的消光比优于 0.003 ,此时公式简化带来的光强变化误差为 0.15% ,拟合精度限制了校正系数的精度。

经过以上的测量计算,即可得到系统校正模型中的等效偏振系数及系统参数。相比于 POLDER 等偏振探测系统[16]的定标方法,该校正方案简便可行、校正精度高,且无需改变偏振光谱测量系统,可实现偏振光谱测量系统的校正和测量一体化。

4 实验验证

4.1 校正系数获取

多角度偏振光谱测量系统如图 6 所示。其中,无偏准直光源置于多维精密调整台上,以便调整光轴;样品置于多维调整载物台上,且可更换标准板进行比对测量;旋转线偏振片装于 Newport 精密旋转台上,并固定于光谱仪镜头入瞳处,几何中心位于探测系统的光轴上;为降低杂散光的影响,在偏振片与探测镜头间设置孔径光阑。光谱

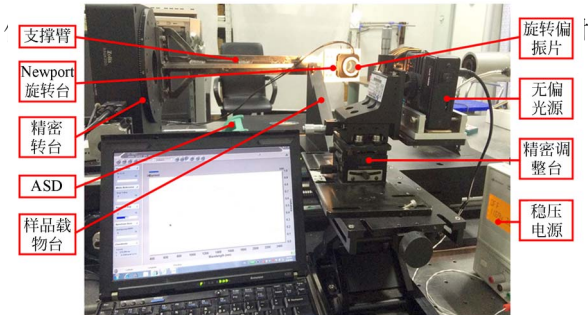


图 6 多角度偏振光谱测量系统

Fig. 6 Photo of multi-angle polarization spectral measurement system

定标,探测镜头为 1° 视场,通过支撑臂连接于精密转台上,可精确控制探测角度。当系统进行起偏效应校正时,只需移走样品载物台,通过转台旋转将镜头正对无偏光源即可。本系统可实现样品的相对反射率、绝对反射率、BRDF、BPDF 等光谱曲线的获取。

根据前述原理,将系统转至起偏效应校正模式,首先测量无偏振片时的入射光强;然后安装偏振片,设置 Newport 精密旋转台的旋转步长为 0.5° ,旋转角度为 $0\sim 340^\circ$;每个偏振角度下 ASD 波谱仪采集 10 组数据,以降低噪声的影响。采集到的各偏振角度的光强如图 7 所示。

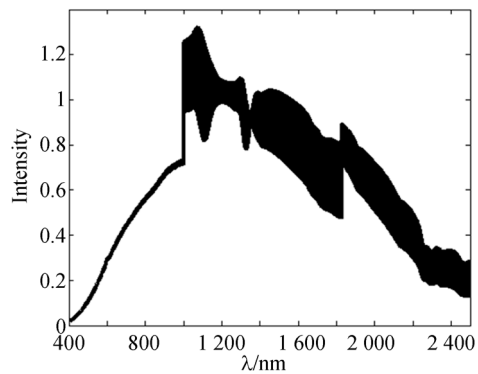
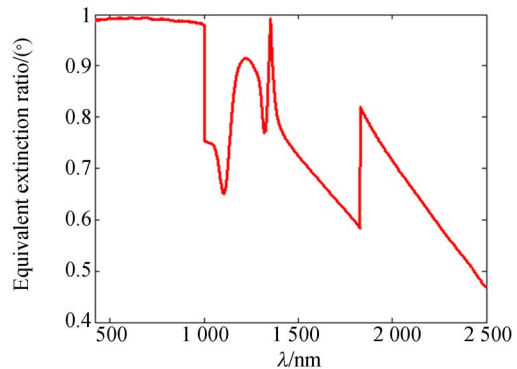


图 7 实验采集到的各偏振角度光强曲线

Fig. 7 Curves of collected intensity for each polarization angle

利用前述拟合模型进行逐波长最小二乘拟合,通过拟合系数 $A(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$ 、 $C(\lambda)$ 得到等效偏振系数曲线,如图 8 所示。

将等效偏振系数代入式(8),从而得到校正前后无偏光源的偏振度-光谱曲线对比,如图 9 所示。由图 9 可知,校正后无偏光源的偏振度曲线平滑变化且均低于 0.5% ,从而证明了本文提出的校正方法的有效性。



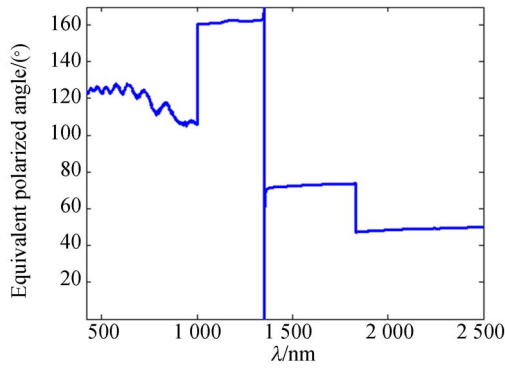


图 8 ASD 等效偏振系数曲线

Fig. 8 Curves of equivalent polarization coefficient of ASD

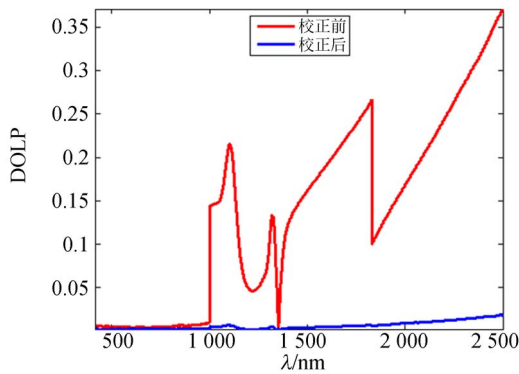


图 9 校正前后无偏光源的偏振度曲线

Fig. 9 DOLP of unpolarized light before and after correction

4.2 偏振光源验证

为充分得到本校正方法的精度,利用玻璃片堆型变偏振度光源进行验证,该装置如图 10 所示。

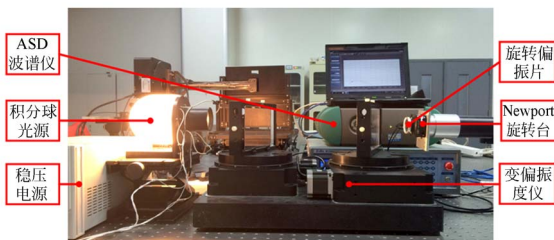
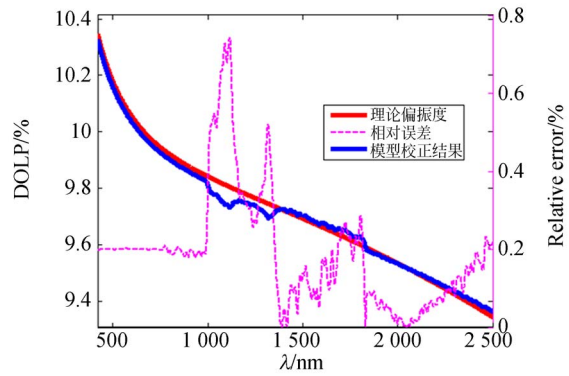


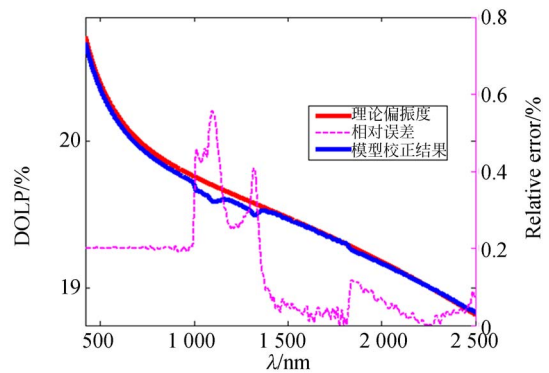
图 10 变偏振度光源验证装置

Fig. 10 Verification system with light source with variable polarization degree

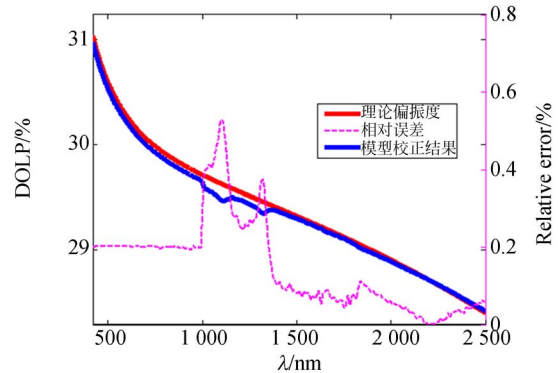
由于本变偏振度光源的有效偏振度为 0~37%,分别采用偏振度(670 nm 处)为 10%,20%,30%的偏振光束入射偏振探测系统,得到的校正结果及理论偏振度对比如图 11 所示。



(a)10%



(b)20%



(c)30%

图 11 变偏振度光源验证结果

Fig. 11 Verification result for light source with variable polarization degree

表 1 验证结果误差统计

Tab. 1 Average of relative errors of verification result (%)

$\delta(\lambda)/\text{nm}$	理论偏振度(670 nm)/%		
	10	20	30
420-1 000	0.197	0.201	0.201
1 000-1 830	0.276	0.183	0.193
1 831-2 500	0.079	0.046	0.045

由图 11 及表 1 的误差统计结果可知,校正后偏振度与理论偏振度的误差在大部分波段内均低于 0.5%,各波段平均相对误差低于 0.3%,从而得到本校正方法的精度为 0.5%。由于自然目标及人造目标的偏振度为 5%以上,本方法的校正精度满足偏振测量的要求。

5 结 论

本文针对分时偏振光谱测量系统中短波红外

起偏效应大、测量精度低的问题,从系统结构出发分析了起偏原因,根据偏振传输理论建立了校正模型,并针对本测试系统,提出了校正系数的高精度测量方法。通过实验验证,本方法的校正精度在大部分探测波段内均高于 0.5%,满足实验室测量目标偏振光谱信息、建立偏振特征数据库及偏振特性精确反演的要求。同时,本校正方法可完全避免过分追求低起偏性带来的成本提升,对偏振光谱测量系统的研制具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3):539-545.
LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):539-545. (in Chinese)
- [2] BEN B, OPPENHEIM U P, BALFOUR L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared[J]. *SPIE*, 1993, 1971:68-77.
- [3] CREMER F, DE JONG W, SCHUTTE K. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(5):1021-1032.
- [4] HYDE M W, SDHMIDT J D, HAVRILLA M J, *et al.*. Determining the complex index of refraction of an unknown object using turbulence-degraded polarimetric imagery[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(12):126201(1-11).
- [5] 张军强,薛闯,高志良,等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 679-698.
ZHANG J Q, XUE CH, GAO ZH L, *et al.*. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 679-698. (in Chinese)
- [6] 战永红,刘卿,杨迪,等. 表面粗糙材质的复折射率反演[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(8):2178-2184.
ZHAN Y H, LIU Q, YANG D, *et al.*. Inversion of complex refractive index for rough-surface objects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2178-2184. (in Chinese)
- [7] 王霞,邹小凤,金伟其. 粗糙表面反射辐射偏振特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11):1327-1331.
WANG X, ZOU X F, JIN W Q. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness objects [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(11): 1327-1331. (in Chinese)
- [8] PRIEST R G, MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(5): 988-993.
- [9] 龚忠清,孙晓兵,张莽,等. 偏振傅里叶变换红外光谱仪定标研究[J]. 量子电子学报, 2011, 28(2): 142-146.
GONG ZH Q, SUN X B, ZHANG Q, *et al.*. Calibration of polarimetric Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2011, 28(2):142-146. (in Chinese)
- [10] 王霞,夏润秋,金伟其,等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10):3175-3182.
WANG X, XIA R Q, JIN W Q, *et al.*. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10):3175-3182. (in Chinese)
- [11] ASD. FieldSpec 4 Standard-Res Spectroradiometer [EB/OL]. <http://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-standard-res>.
- [12] 石顺祥,王学恩,刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008:33-34.
SHI SH X, WANG X E, LIU J S. *Physical Optics and Applied Optics*[M]. Xian: Xidian University Publisher, 2008:33-34. (in Chinese)
- [13] CHIPMAN R A. *Mueller Matrices*[M]. In *Handbook of Optics*. New York: McGraw-Hill, 2009.

- [14] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:58.
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003:58. (in Chinese)
- [15] 赵永强,潘泉,程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011:43.
ZHAO Y Q, PAN Q, CHENG Y M. *Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry press, 2011:43. (in Chinese)
- [16] BRET-DIBAT T, ANDRE Y A, LAHERRERE J M, *et al.*. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [J]. *SPIE*,1993, 2553: 218-231.
- [17] 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.
SONG M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(6): 1153-1158. (in Chinese)

作者简介:



张海洋(1988—),男,山东潍坊人,博士研究生,2013年于山东大学获得学士学位,主要从事偏振遥感系统及定标方面的研究。E-mail: haiyang8930@163.com

通信作者:



张军强(1981—),男,江苏泰兴人,博士,副研究员,2004年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2012年于长春光机所获得博士学位,主要从事偏振、光谱仪器的研制、光机系统整体性能评价等方面的研究工作。E-mail: zjq1981_81@163.com

导师简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士后,研究员,博士生导师,2001年于长春光机所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术,多光谱、超光谱空间遥感成像技术、偏振探测技术等方面的研究。E-mail: yanx@ciomp.ac.cn