

文章编号: 0253-2239(2008)06-1191-06

激光遥感偏振成像系统光学元件调整及误差分析

张绪国 江月松 路小梅

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要 改进了利用双旋转波片方法进行偏振成像的实验装置,提出了通过一次测量获得目标偏振度和强度编码图像的方法。运用光强法对激光遥感偏振成像装置的光学元件进行调整,通过斯托克斯和穆勒矩阵在偏振光学元件中的应用,给出了相应光学元件的调整原理、方法及过程。分析了激光器中心波长变动、偏振片的角度误差和波片的相位延迟及角度误差对整个系统的影响。结果表明,由偏振片角度和波片角度误差造成的出射光斯托克斯误差较小,不超过 0.001,可以忽略;由波片相位延迟不精确造成的误差在 0.02 左右,所以应采用延迟精度较高的波片;激光器中心波长变化的影响最大,不能忽略,必须加滤光片使接收光的中心波长控制在 808 nm;镀有铝膜望远镜对接收到的散射光偏振度影响较小,适于激光遥感偏振成像系统的应用。

关键词 激光遥感; 偏振成像; 光学元件调整; 误差分析

中图分类号 TP7 文献标识码 A

Adjustment of Optical Elements and Error Analysis for Laser Remote Sensing Polarization Imaging System

Zhang Xuguo Jiang Yuesong Lu Xiaomei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The experimental setup for polarization imaging based on dual-rotating-retarder technique is modified, and a method to obtain two images encoded by polarization degree and intensity with a single measurement process is proposed. The optical intensity method is used to the laser remote sensing polarization imaging equipment. Through the application of Stokes and Mueller matrices for polarization elements, the principle, method and process of corresponding optical elements adjustment are given. The influence of laser central wavelength variation, polarizer angle error, wave plate phase retardance and angle errors on the whole system is analyzed. The results show that the emitted Stokes error caused by the angle error of polarizer and wave plate is less than 0.001, and can be neglected. The error caused by the retardance accuracy of wave plate is about 0.02, so the wave plate with higher accuracy should be selected. The influence caused by variation of laser central wavelength is the largest, and cannot be neglected, so a filter should be added to control the central wavelength of the received light at 808 nm. Telescope coated with aluminium has little influence on the polarization degree of scattered light, and it is suitable for the laser remote sensing polarization imaging system.

Key words laser remote sensing; polarization imaging; optical elements adjustment; error analysis

1 引 言

偏振主动成像是一种较新的成像技术,它通过一系列不同偏振状态的光对目标和背景进行照明,

然后测量从目标散射回来光的不同偏振状态的图像^[1]。利用双旋转波片技术(Dual-rotating-retarder technique, DRRT)通过 16 次测量获得目标的穆勒

收稿日期: 2007-10-18; 收到修改稿日期: 2007-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(40571097)和航空基础科学基金(2005ZF51073)资助课题。

作者简介: 张绪国(1982—),男,博士研究生,主要从事激光遥感偏振成像理论和实验等方面的研究。

E-mail: zxg_ltt@163.com

导师简介: 江月松(1959—),教授,博士生导师,主要从事光电成像遥感理论与技术、毫米波与 THz 光子学成像技术等方面的研究。E-mail: yuesongjiang@vip.sina.com

矩阵^[2],利用所得的穆勒矩阵分析目标对入射光的消偏振特性,从而可以分析目标的散射特性及内部机理,同时可以利用偏振度对目标成像。在具有相同反射率情况下,利用人造目标和自然背景消偏振特性的不同可以更好的区分目标和背景^[3]。同时,对于伪装的目标,其反射率和自然背景可能相同,但是它们却有不同偏振度,利用偏振度对目标成像就可以发现隐藏目标,而强度成像却不能发现隐藏目标,因此利用偏振主动成像还可以达到识别伪装目标的目的^[4,5]。本文介绍了光强法在光学系统调整中的应用,分析了元件调整时误差及本身精度对

整个系统误差造成的影响。

2 实验装置及偏振探测原理

2.1 实验装置

典型的激光雷达遥感系统由激光器、发射系统、接收系统和成像及信号处理系统组成。激光雷达偏振遥感成像系统还在发射系统中加入偏振状态产生部分-偏振态发生器(PSG),在接收系统中加入偏振状态检测部分-偏振态分析仪(PSA),实验装置原理图如图1所示。

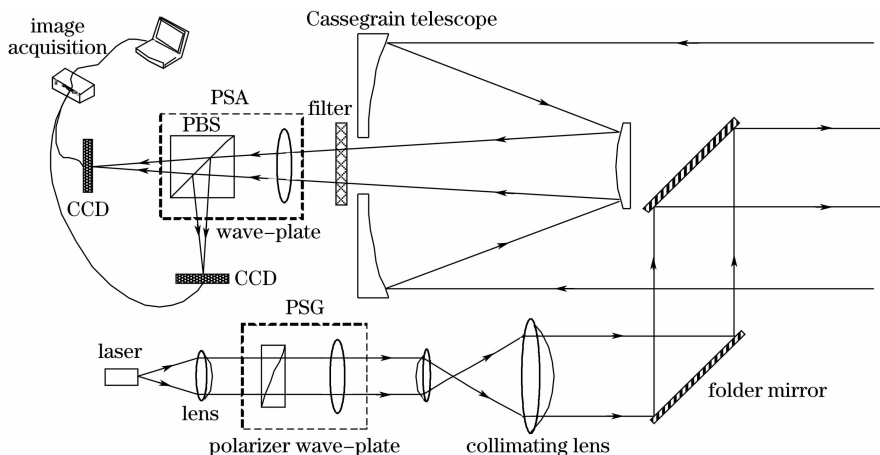


图1 实验装置原理图

Fig.1 Experimental setup

偏振成像实验装置为了测量目标的穆勒矩阵,一般采用 R. M. A. Azzam^[6]提出的双旋转波片技术的方法,该方法通过旋转偏振态发生器和偏振态分析仪中的波片,进行16次测量可以获得目标的穆勒矩阵,从而分析目标对入射光的消偏振影响。S. Breugnot 等^[2]通过实验证明,在只研究目标(目标中没有双折射材料)对入射光的消偏振特性时,穆勒矩阵对角线以外的元素可以忽略,利用散射光的偏振度编码可以获得衬比度较强的图像,并对实验装置进行改进,提出了两次测量的方法。在此基础上,提出了一次测量的方法,利用偏振分光棱镜(PBS)代替偏振态分析仪中的偏振片,利用两个 CCD 相机同时接收偏振状态相互垂直的目标像。通过特定入射光照射目标可以一次测量求得目标的偏振度,从而可得目标偏振度编码的图像。

实验装置中激光源采用 10 W-CW 808 nm 半导体激光器,偏振态发生器中偏振片采用具有大损伤阈值的格兰激光棱镜,消光比小于 5×10^{-6} ,波片采用准零级 $\lambda/8$ 石英波片,准直及扩束透镜采用大损伤阈值的平凸透镜,接收系统采用镀有铝膜的卡

塞格林望远镜。

2.2 偏振探测原理

在研究目标对入射光的消偏振特性时,如果背景中没有双折射材料,目标的穆勒矩阵对角线上元素可以忽略^[2],根据偏振度公式

$$P_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 m_{ij}^2 - m_{00}^2}{3m_{00}^2}}, \quad (1)$$

在对角线元素近似为 0 的情况下,目标的穆勒矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{00} & & & \\ & M_{11} & & \\ & & M_{22} & \\ & & & M_{33} \end{bmatrix},$$

因此偏振度的公式可以简化为

$$P_d = \frac{M_{11} + M_{22} + M_{33}}{3M_{00}}. \quad (2)$$

为了实现一次测量获得两个偏振方向相互垂直的图像,同时可以根据(2)式计算出目标的偏振度,其出射光的斯托克斯矢量必须满足^[2]

$$\mathbf{S}_{in} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 \\ -0.57735 \\ -0.57735 \\ -0.57735 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 I 表示总光强, Q 为水平或垂直偏振量, U 为 $\pm 45^\circ$ 线偏振量, V 为左旋或右旋圆偏振量。因此偏振态发生器中起偏器(P1)透光轴和 x 轴的夹角应为

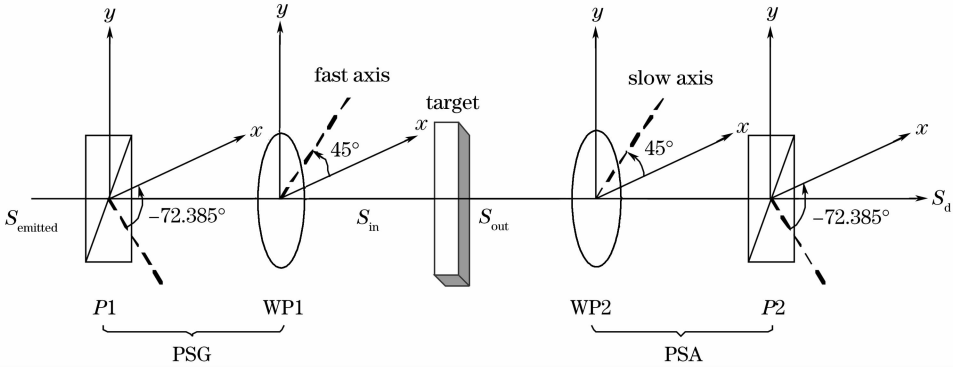


图 2 偏振探测示意图

Fig. 2 Sketch for polarization detection

入射到目标表面光的斯托克斯矢量相当于被目标的穆勒矩阵调制,其斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{in} = \begin{bmatrix} M_{00} \\ -M_{11}/\sqrt{3} \\ -M_{22}/\sqrt{3} \\ -M_{33}/\sqrt{3} \end{bmatrix},$$

经过偏振态分析仪后,由 CCD 接收到的两个偏振方向相互垂直的光强度为: I_1 表示偏振片 P_1 和 P_2 透射方向相同时的光强, I_2 表示 P_1 和 P_2 透射方向相互垂直时的光强:

$$I_1 = M_{00} + \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33}),$$

$$I_2 = M_{00} - \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33}),$$

由(2)式可求出

$$P_d = \frac{M_{11} + M_{22} + M_{33}}{3M_{00}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (4)$$

总光强为

$$I = I_1 + I_2. \quad (5)$$

这样就能够通过一次测量同时获得偏振度和强度,因此可以同时得到偏振度和强度编码的图像。

2.3 实验装置工作过程

激光器发出的光首先经过准直透镜准直,通过偏振状态产生装置,获得所需偏振状态的光,然后通过准直扩束系统照射到目标。照射到目标的光,经

-72.385° 、波片(WP1)快轴与 x 轴夹角为 45° ;偏振态分析仪中 PBS(P2)透光轴和 x 轴夹角为 -72.385° 、波片(WP2)慢轴与 x 轴的夹角为 45° [2,6]。偏振探测的示意图如图 2 所示。激光器发出的光经过偏振态发生器,照射到目标,目标的前向或后向散射光接收后通过偏振态分析仪最后到达探测器。

过目标的表面散射和体散射后部分散射光由望远镜接收(表面散射和体散射相当于对入射光进行调制,表面散射不改变目标的偏振度,而体散射,由于在目标内部可能进行多次反射,会对目标的偏振度产生影响,即消偏振,从而改变入射光的偏振度)[7],然后进入偏振状态检测装置,经偏振分束器分束后变为两个偏振状态相互垂直的光,由 CCD 接收,最后通过简单的图像加减运算便可得到所需偏振度和强度编码的图像。

3 光学元件调整

3.1 偏振片和波片角度的调整

偏振片和波片角度调整原理如图 3 所示[8]。通过斯托克斯-穆勒法可以求出通过测量系统的光强[9]

$$I = \frac{1}{4}I_0[2\cos^2(\theta_1 - \theta_3) - (1 - \cos \delta)\cos 2\theta_1 \cos 2\theta_3 + (1 - \cos \delta)\cos 2\theta_2 \cos 2(\theta_2 - \theta_1 - \theta_3)]. \quad (6)$$

首先调整起偏器 P_1 和 P_2 垂直,假设偏振片 P_1 的透光轴与 x 轴重合,即 $\theta_1 = 0^\circ$,则 $\theta_3 = 90^\circ$ 。代入(6)式得

$$I = \frac{1}{2}I_0 \sin^2 2\theta_2 \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (7)$$

对于 $\lambda/8$ 波片,相位延迟 $\delta = 45^\circ$ 。旋转波片找出最小

光强点,即 $I=0$ 时波片的位置,由(7)式可知 $\theta_2=0^\circ$,此时波片快轴方向与 x 轴方向一致,逆时针旋转波片 45° 即可得到波片所需角度。同理另一个波片顺时针调节 45° ,使其慢轴与 x 轴成 45° 。最后再把起偏器顺时针调节 72.385° ,检偏器逆时针调节 17.615° ,从而得到所需的偏振片和波片的角度。为了得到较高的

精度,消除偏振片透射方向的误差,可以保持偏振片不动,直接旋转波片,只需在此基础上加上或减去偏振片所需旋转的角度,即偏振态发生器中波片旋转 $45^\circ+72.385^\circ=117.385^\circ$,偏振态分析仪中波片旋转逆时针旋转 $72.385^\circ-45^\circ=27.385^\circ$,最后检偏器旋转 90° ,使其透射方向与起偏器透射方向保持一致。

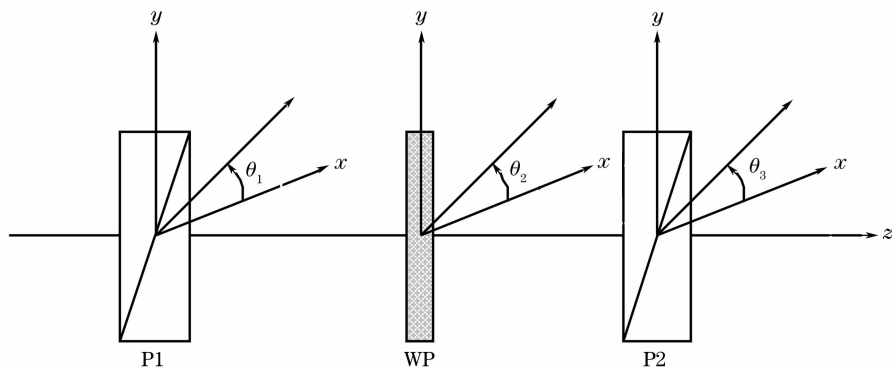


图 3 光强法调整偏振片和波片示意图

Fig. 3 Adjustment sketch of polarizer and wave-plate using intensity method

3.2 准直透镜及扩束透镜的调整

由半导体激光器发出光的中心波长为 808 ± 10 nm,经光纤输出,光纤芯径 $440 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.22$ 。由

$$NA = n_0 \sin \theta_{\max}, \quad (8)$$

空气的折射率 $n_0 \approx 1$,可以求出光纤发出光的发散角 $\theta_{\max}=12.7^\circ$ 。准直透镜采用焦距为 40 mm 的平凸透镜,由于光纤芯径比较小可以看成点光源,因此只需要把光纤放置在准直透镜后 40 mm 处即可,经过透镜后入射光变为光斑直径为 17.74 mm 的平行光束。偏振态发生器之后的扩束透镜采用放大倍数为 1.8 倍的透镜组合,并使出射光束具有约 $1^\circ \times 1^\circ$ 的发散角。

3.3 折光镜与望远镜的调整

为了使卡塞格林望远镜接收到更多的目标散射光,采用折光棱镜使得出射光束和望远镜中心保持一

致。调整折光棱镜的方向,使其与出射光方向成 45° 。

4 误差分析

4.1 激光器中心波长变化的影响

激光器中心波长的偏移会导致 $\lambda/8$ 波片相位延迟的不准确,因此中心波长变化可以看成是波片相位延迟不准确对出射光造成的影响。

4.2 透镜的偏振色差的影响

实验中应尽量采用偏振色差较小的透镜用于准直及扩束,透镜偏振色差直接影响到出射光束的准确性^[1]。

4.3 偏振片透射方向的影响

对于偏振态发生器中偏振片透射方向的不精确以及消光比过大(此处采用的格兰激光棱镜消光比小于 5×10^{-6}),都可以造成出射光的斯托克斯矢量不能满足(3)式的要求。偏振片的穆勒矩阵为

$$M_{P1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 & 0 \\ \cos 2\theta_1 & \cos^2 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 & 0 \\ \sin 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 & \sin^2 2\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

波片的穆勒矩阵为

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_2 + \sin^2 2\theta_2 \cos \delta & \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta_2 \sin \delta \\ 0 & \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta_2 + \cos^2 2\theta_2 \cos \delta & \cos 2\theta_2 \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta_2 \sin \delta & -\cos 2\theta_2 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (10)$$

假设激光器发出的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{emitted}} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

则出射光的斯托克斯矢量为(忽略系数)

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \mathbf{M}_c \mathbf{M}_{\text{P1}} \mathbf{S}_{\text{emitted}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta_1 (\cos^2 2\theta_2 + \sin^2 2\theta_2 \cos \delta) + \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 (1 - \cos \delta) \\ \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 (1 - \cos \delta) + \sin 2\theta_1 (\sin^2 2\theta_2 + \cos^2 2\theta_2 \cos \delta) \\ \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \sin \delta - \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $\theta_1 = -72.385^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\delta = 45^\circ$ 。此时 \mathbf{S}_{in} 的表达式为(3)式,如果偏振片透光轴的方向误差为 Δ_1 ,则 θ_1 变为 $(\theta_1 + \Delta_1)$ 。偏振片采用精度为 0.00125° 的步进电机旋转。假设偏振片的透光轴旋转角度最大误差为 0.002° ,出射光的斯托克斯矢量变为

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.57757 \\ -0.57692 \\ -0.57757 \end{bmatrix},$$

与(3)式所要求的出射光的斯托克斯矢量基本一致,误差小于 0.001 ,可以忽略。同理可以分析偏振态分析仪中偏振分光棱镜 PBS 的影响。

4.4 波片快轴方向和延迟精度的影响

波片采用准零级石英波片,延迟度小于 $\lambda/300$,同样波片采用精度为 0.00125° 的步进电机旋转,在只考虑波片快轴方向误差时,由(11)式可以求出出射光的斯托克斯矢量

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.57759 \\ -0.57768 \\ -0.57761 \end{bmatrix}.$$

和(3)相比,可以看出波片角度误差影响较小,最大值不超过 0.001 ,可以忽略。

在只考虑延迟精度影响时,出射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.56537 \\ -0.57686 \\ -0.58956 \end{bmatrix},$$

和(3)相比,可以看出波片的延迟精度对出射光斯托克斯影响较大,最大可以达到 0.02 。因此实验中应尽量选择延迟精度比较高的波片。

激光器波长变化的影响可以看成波片延迟精度的影响,因为激光器中心波片为 $808 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$,可以看成波片的最大延迟误差在 $\lambda/80$ 左右,和 $\lambda/300$ 相比,其影响占主要因素,出射光斯托克斯矢量的 Q 、 U 、 V 分量的变化如图 4 所示。

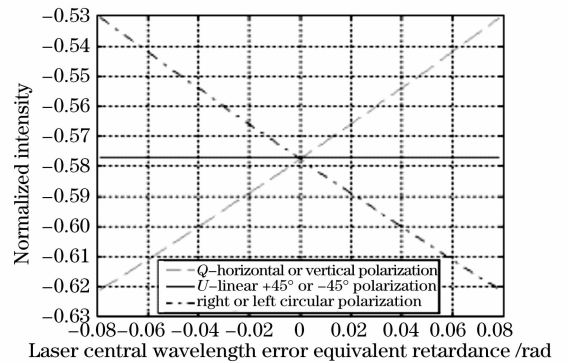


图 4 斯托克斯矢量 Q 、 U 、 V 分量随激光器波长的变化
Fig. 4 Variation of Stokes components Q , U , V versus laser wavelength

由图 4 可知,斯托克斯矢量的 Q 分量随波长增加而线性增加, U 分量不受波长影响, V 分量随波长线性减小。因此为了得到所要求的出射光的斯托克斯矢量,需要在望远镜后加中心波长为 808 nm 的滤光片^[10],使入射到波片上的光的中心波长尽可能在 808 nm ,以保证出射光的准确性。

4.5 望远镜对偏振度的影响

接收系统采用卡塞格林望远镜,因为它能消除球差和彗差,且具有结构紧凑的特点。由于采用偏振成像,要使望远镜对接收到的散射光偏振度影响最小,使接收到的目标的散射光的偏振特性尽量反应目标的消偏特性,需要在望远镜表面镀适当的膜层。镀银膜的望远镜对散射光的偏振度影响最小,其次是铝膜、水银膜、金膜,镀有铝膜的望远镜对入射光偏振度影响基本可以忽略^[11]。

5 结 论

通过对偏振激光成像系统光学元件精度误差的分析可知,对于偏振片和波片的旋转角度需要有较高的精度,否则会出现较大的误差;波片需要有极高的延迟精度,波片很小的延迟误差能够导致出射光斯托克斯矢量的较大变化,从而出现测量错误;准直扩束系统应采用偏振色差较小的透镜;激光光源中心波长的变化是影响出射光的主要因素,应尽量加以消除。

参 考 文 献

- 1 Russell A. Chipman. Polarization diversity active imaging[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3170**: 68~73
- 2 Sébastien Breugnot, Philippe Clémenceau. Modeling and performances of a polarization active imager at $\lambda = 806$ nm[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(10): 2681~2688
- 3 Cornell S. L. Chun, Firooz A. Sadjadi. Target recognition study using polarimetric laser radar[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5426**: 274~284
- 4 P. Clémenceau, S. Breugnot, L. Collot. Polarization diversity active imaging[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3380**: 284~291
- 5 Li Quan, Liu Zejin, Shu Bohong. Application of polarization diversity in active imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 351~354
- 黎 全,刘泽金,舒柏宏. 利用表面散射光偏振差异的目标识别技术[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3): 351~354
- 6 R. M. A. Azzam. Mueller-matrix ellipsometry: a review[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3121**: 400~409
- 7 L. Le Hors, P. Hartemann, S. Breugnot. Multispectral polarization active imager in the visual band[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4035**: 380~388
- 8 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688
- 孙英姿,王东光,张洪起 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 685~688
- 9 Edward Collett. Polarized Light. *Fundamentals and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 1993
- 10 Songxin Tan, Ram M. Narayanan. A multiwavelength airborne polarimetric lidar for vegetation remote sensing: instrumentation and preliminary test results[C]. *Proc. IEEE*, 2002. 2675~2677
- 11 Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. The polarization analysis of the telescope used for the lidar polarization active imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1771~1774
- 路小梅,江月松,饶文辉. 激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1771~1774