

基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统

罗敬¹ 刘东¹ 徐沛拓¹ 白剑¹ 刘崇¹ 汪凯巍¹ 杨甬英¹ 唐培钧¹ 成中涛¹ 刘艳阳²

¹浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

摘要 针对现有普通偏振分光棱镜(PBS)消光比低、偏振串扰等不足,提出一种由 PBS 和偏振片构成的高精度偏振分光系统。在 PBS 的反射通道和透射通道插入偏振片,并调整偏振片的透光轴方向,以便最大程度地抑制偏振串扰。理论计算和数值仿真一致表明,该偏振分光系统能够实现更高精度的偏振分光。实验测得,当入射光强度比为 -47.5 dB 时,普通 PBS 的偏振分光误差为 57.3% ,添加了偏振片的偏振分光系统的偏振分光误差为 14.3% ;而当入射光强度比为 47.8 dB 时,普通 PBS 的偏振分光误差为 15.5% ,添加了偏振片的偏振分光系统的偏振分光误差为 8.6% 。提出的偏振分光系统简单实用,可广泛应用于偏振光学系统中。

关键词 遥感; 偏振分光; 偏振激光雷达; 偏振串扰; 偏振分光棱镜; 偏振分光精度

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1210001

High-Precision Polarizing Beam Splitting System Based on Polarizing Beam Splitter

Luo Jing¹ Liu Dong¹ Xu Peituo¹ Bai Jian¹ Liu Chong¹ Wang Kaiwei¹
Yang Yongying¹ Tang Peijun¹ Cheng Zhongtao¹ Liu Yanyang²

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

²China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China

Abstract The poor extinction ratio and polarization cross talk of a general polarizing beam splitter (PBS) promote us to propose a high-precision polarizing beam splitting system, which consists of a PBS and polarizers. The additional polarizers are insert into reflection channel and transmission channel of the PBS, and the transmission axis direction of polarizer is adjusted, which can minimize the polarization cross talk. Both the theoretical calculation and numerical simulation demonstrate that this polarizing beam splitting system can achieve polarization splitting with higher accuracy. The experimental results show that when the intensity ratio of incident light is -47.5 dB, the polarizing beam splitting error caused by a general PBS is 57.3% , while it is 14.3% after adding polarizer. When the intensity ratio of incident light is 47.8 dB, the polarizing beam splitting error caused by a general PBS is 15.5% , while it is 8.6% after adding polarizer. The proposed polarizing beam splitter system is simple and practical, which can be employed in many polarized optical systems.

Key words remote sensing; polarizing beam splitting; polarization lidar; polarization cross talk; polarizing beam splitter; polarizing beam splitting accuracy

OCIS codes 280.4788; 230.1360; 010.3640; 120.0280; 120.5410

收稿日期: 2016-08-03; 收到修改稿日期: 2016-09-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0200700, 2016YFC1400902)、国家自然科学基金(41305014, 61475141)、浙江省公益技术研究项目(2016C33004)

作者简介: 罗敬(1992—),男,博士研究生,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。E-mail: jingluo0711@163.com

导师简介: 刘东(1982—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事光电检测与遥感技术方面的研究。

E-mail: liudongopt@zju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

偏振分光棱镜(PBS)广泛应用于多种光学系统中^[1-3]。平行偏振光(P光)经过理想 PBS 会全部被透射,垂直偏振光(S光)则全部被反射(所述的 P 光和 S 光均相对于 PBS 的入射面)。然而,实际上 PBS 无法将入射光中的 S 光和 P 光完全分开,部分 S 光会进入透射通道(S 光的透射率 $T_s > 0$),部分 P 光会进入反射通道(P 光的反射率 $R_p > 0$),从而形成偏振串扰并对光学系统造成显著影响^[1,4-5]。

在偏振激光雷达等光学系统中^[4,6-9],一个非常重要的过程是准确得到回波信号中 S 光与 P 光的强度比。PBS 作为常用的偏振分光器件,通过测量其反射通道和透射通道出射光的强度比,并结合必要的系统定标^[4],可得到反演强度比。然而,由于实际 PBS 存在偏振串扰,导致测得的反演强度比并不等于入射光中 S 光与 P 光的强度比,从而造成偏振分光误差。大量研究表明^[4,10],消除偏振分光误差对于提高偏振激光雷达等光学系统的探测精度至关重要。

本文提出一种基于 PBS 的高精度偏振分光系统。该系统通过在 PBS 的反射通道和透射通道插入一定透光轴的偏振片,从而有效地抑制了偏振串扰。理论仿真和实验结果均表明,该系统的偏振串扰大大降低,能够显著提高偏振分光精度。

2 基本原理

当一束光入射到 PBS 后,其反射通道和透射通道探测器记录的强度比为

$$\frac{I_R^a}{I_T^a} = \frac{\eta_R(I_p R_p + I_s R_s)}{\eta_T(I_p T_p + I_s T_s)}, \quad (1)$$

式中 I_s 和 I_p 分别为入射光中 S 光和 P 光的光强,其比值为 $V_0 = I_s/I_p$; R_i 和 T_i 分别为 PBS 对偏振光($i = p$ 为 P 光, $i = s$ 为 S 光)的反射系数和透射系数; η_R 和 η_T 分别为反射通道和透射通道探测器的光电转换系数,其比值为增益比 $G = \eta_R/\eta_T$ ^[4]。偏振分光系统的最终目的是使得测量的强度比等于入射光中 S 光与 P 光的比值 V_0 。然而,即使是理想的 PBS,有 $T_p = R_s = 1, T_s = R_p = 0$,代入(1)式可以发现,反射通道和透射通道的强度比等于 $G \cdot V_0$ 。显然,如果两通道探测器的增益比 $G \neq 1$,将会造成测量误差。因此需要对偏振分光系统进行定标^[4]:将一束自然光入射到 PBS,记录偏振分光系统两出射通道的强度比。对于自然光,存在 $I_s = I_p$,代入(1)式容易得到反射通道与透射通道出射光的强度比为 $G \cdot (R_s + R_p)/(T_s + T_p)$ 。结合(1)式,仅采用 PBS 得到的反演强度比可以表示为^[10]

$$V_a = \frac{I_R^a}{I_T^a} \cdot \frac{T_s + T_p}{G(R_s + R_p)} = \frac{R_p + V_0 R_s}{T_p + V_0 T_s} \cdot \frac{T_s + T_p}{R_s + R_p}. \quad (2)$$

从(2)式可以发现,通过定标过程,消除了两通道探测器增益比的影响。此时对于理想 PBS, $V_a = V_0$ 显然成立。事实上,当 $T_s = R_p = 0$ 时,即使 $T_p \neq R_s \neq 1, V_a = V_0$ 依然成立。这表明只要将反射通道和透射通道的偏振串扰完全抑制,即便两个通道都存在光能损失,也能够消除偏振分光误差。因此,所提出在 PBS 的反射通道和透射通道各放置一片偏振片,如图 1 所示。调整两偏振片的透光轴方向,使得反射通道的偏振片 1 对 P 光的透射率最小(对 S 光的透射率最大),透射通道的偏振片 2 对 S 光的透射率最小(对 P 光的透射

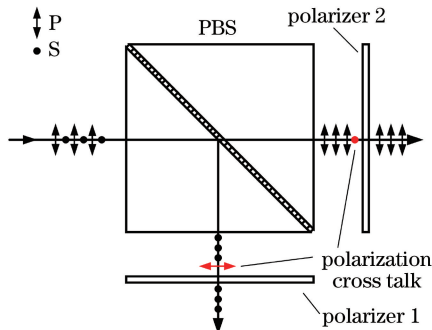


图 1 偏振分光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarizing beam splitting system

率最大),两个出射通道的偏振串扰均被最大程度地抑制。

设所添加偏振片的极大透射率和极小透射率(入射光的偏振方向与偏振片的透光轴平行即为极大透射率,垂直则为极小透射率)分别为 T_{\max} 和 T_{\min} ,其消光比为 $E = T_{\max}/T_{\min}$ 。添加偏振片后,反射通道和透射通道探测器记录的强度比为

$$\frac{I_R^b}{I_T^b} = \frac{\eta_R(I_p R_p \cdot T_{\min} + I_s R_s \cdot T_{\max})}{\eta_T(I_p T_p \cdot T_{\max} + I_s T_s \cdot T_{\min})} \quad (3)$$

同样,首先需要利用自然光进行系统定标,得到反射通道和透射通道出射光的光强比为 $G \cdot (R_s E + R_p)/(T_s + T_p E)$ 。结合(3)式可以得到反演强度比 V_b 为

$$V_b = \frac{I_R^b}{I_T^b} \cdot \frac{T_s + T_p E}{G(R_s E + R_p)} = \frac{R_p + V_0 R_s E}{T_p E + V_0 T_s} \cdot \frac{T_s + T_p E}{R_s E + R_p}, \quad (4)$$

式中 E 为偏振片的消光比, G 为增益比且 $G = \eta_R/\eta_T$ 。

为了便于计算和比较,将前面提到的入射光强度比 V_0 以及反演强度比 V_a 和 V_b 都换算成 dB,即

$$\begin{cases} \bar{V}_0 = 10\log_{10}(V_0) \\ \bar{V}_a = 10\log_{10}(V_a) \\ \bar{V}_b = 10\log_{10}(V_b) \end{cases} \quad (5)$$

定义偏振分光误差 Φ 为

$$\Phi = \left| \frac{\bar{V}_i - \bar{V}_0}{\bar{V}_0} \right| \times 100\%, \quad (6)$$

式中 \bar{V}_i 为偏振分光系统测得的反演强度比, $i = a$ 表示仅由 PBS 构成的偏振分光系统, $i = b$ 是指由 PBS 和偏振片构成的偏振分光系统。结合(4)~(6)式,由 PBS 和偏振片构成的偏振分光系统的偏振分光误差为

$$\Phi_b = \left| \frac{\log_{10}\left(\frac{1 + V_0 E_R}{V_0 + V_0 E_R} \cdot \frac{1 + E_T}{V_0 + E_T}\right)}{\log_{10}(V_0)} \right| \times 100\%, \quad (7)$$

式中 E_R 和 E_T 分别为该偏振分光系统反射通道和透射通道的消光比,且 $E_R = E \cdot R_s/R_p$, $E_T = E \cdot T_p/T_s$,其中 R_s/R_p 和 T_p/T_s 分别为 PBS 反射通道和透射通道的消光比。

图 1 所示的偏振分光系统的反射通道和透射通道的消光比 E_R 和 E_T 是相互独立的(两出射通道可以添加不同消光比的偏振片),将(7)式中的偏振分光误差 Φ_b 对 E_R 和 E_T 分别求偏导,计算发现两个偏导数均为负数。这表明偏振分光系统的消光比越大,偏振分光误差越小。因此,只要所添加偏振片的消光比 $E > 1$,就能够增大该偏振分光系统两个出射通道的消光比,进而减小偏振分光误差,提高偏振分光精度。所添加偏振片的消光比越大,偏振分光精度越高。

需要特别强调的是,由偏振分光系统得到的反演强度比也可以是透射通道与反射通道出射光强的比值,此时 V_0 相应的是入射光中 P 光与 S 光的强度比,即 $V_0 = I_p/I_s$,同理增益比 $G = \eta_T/\eta_R$ 。这两种表示方式本质上没有区别,不会影响计算结果。

3 仿真实验

为了直观地说明前面的分析结果,下面进行数值仿真。仿真中,根据现有常用 PBS 的光学参数,设定 $T_p = 0.96$, $R_p = 1 - T_p$, $R_s = 0.999$, $T_s = 1 - R_s$,所添加偏振片的消光比 $E = 1000$ 。在不同偏振态入射光的情况下,多个偏振分光系统的反演强度比的变化曲线如图 2(a)所示。当入射光中 S 光与 P 光的强度接近时(入射光强度比 \bar{V}_0 在 0 附近),各个偏振分光系统的反演强度比几乎都等于入射光强度比 \bar{V}_0 。随着 S 光与 P 光光强差异的增大,不同偏振分光系统的反演强度比出现较大差异:理想的 PBS 能够完全分开入射光中的 S 光和 P 光,不存在偏振串扰,故其反演强度比始终等于入射光强度比 \bar{V}_0 ,仿真结果是一条斜率为 1 的直线;然而实际上 PBS 存在偏振串扰,输出的偏振光强度比无法真实地表征入射光的偏振状态,其反演强度比明显偏离 \bar{V}_0 ;在 PBS 出射通道添加偏振片后,其反演强度比则非常接近于 \bar{V}_0 。

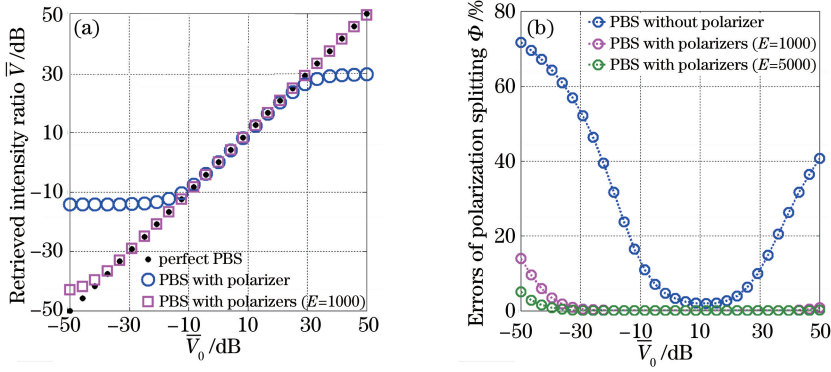


图2 偏振分光仿真结果。(a)反演强度比随入射光偏振态的变化曲线;(b)偏振分光误差随入射光偏振态的变化曲线
Fig. 2 Simulated results of polarizing beam splitting. (a) Relationship between retrieved intensity ratio and polarization state of incident light; (b) relationship between polarizing beam splitting error and polarization state of incident light

偏振分光误差随入射光偏振态的变化曲线如图 2(b)所示。从图 2(b)很容易发现,添加偏振片后,偏振分光误差明显减小;添加偏振片的消光比越大,偏振分光误差越小。该仿真结果与(7)式的理论计算结果完全一致。从图 2(b)中还可以看出,入射光中 S 光与 P 光的强度相差越悬殊,即入射光强度比 \bar{V}_0 越远离 0,偏振分光误差越大。实际上,在偏振激光雷达中^[4,6],为了提高探测精度,其发射激光往往是高偏振度的线偏振光(消光比达到 10^5),且偏振方向与 PBS 入射面尽可能对齐(平行或者垂直),因此回波信号中 S 光与 P 光的强度相差很大。如果仅采用 PBS 进行偏振分光,将导致较大的测量误差。因此,减小偏振分光误差对提高偏振激光雷达的探测精度有重要意义。

另外需要特别指出的是,当两束线偏振光的强度比 \bar{V}_0 的绝对值相等,但符号相反时,表示其消光比相同,而偏振方向相差 90° 。这两束光经过同一个偏振分光系统之后,得到的偏振分光误差不同。例如,对于由 PBS 和消光比 $E=1000$ 的偏振片构成的偏振分光系统[图 2(a)和(b)中的粉色曲线],当 $\bar{V}_0 = -50 \text{ dB}$ 和 $\bar{V}_0 = 50 \text{ dB}$ 时,产生的偏振分光误差分别为 14% 和 0.86% 。产生这一结果的主要原因为:常用的薄膜型 PBS 都存在 $0 < T_s < R_p$,即 S 光形成的偏振串扰会小于 P 光形成的偏振串扰。入射光中 P 光的比例越高,偏振串扰越严重,偏振分光误差也越大。因此,在偏振激光雷达等光学系统中,应该充分利用 PBS 的这一特性,尽可能使发射激光的偏振方向垂直于 PBS 的入射面,从而降低入射光中 P 光的比例。

4 误差分析

在前面的计算过程中,假设了偏振片的透光轴与 PBS 入射面对齐。通常情况下,可以通过判断透射光强的强弱来调整偏振片的透光轴朝向。然而实际上,偏振片的透光轴与 PBS 入射面之间依然会存在偏差角 ϵ ,这将影响系统的偏振分光精度。考虑偏差角 ϵ ,由(3)式可得 PBS 反射通道和透射通道探测器的强度比为

$$\frac{I_R^b}{I_T^b} = \frac{\eta_R [(I_p R_p \cos^2 \epsilon + I_s R_s \sin^2 \epsilon) \cdot T_{\min} + (I_s R_s \cos^2 \epsilon + I_p R_p \sin^2 \epsilon) \cdot T_{\max}]}{\eta_T [(I_s T_s \cos^2 \epsilon + I_p T_p \sin^2 \epsilon) \cdot T_{\min} + (I_p T_p \cos^2 \epsilon + I_s T_s \sin^2 \epsilon) \cdot T_{\max}]}, \quad (8)$$

由(4)式得到反演强度比为

$$V_b = \frac{(R_p \cos^2 \epsilon + V_0 R_s \sin^2 \epsilon) + (V_0 R_s \cos^2 \epsilon + R_p \sin^2 \epsilon) \cdot E}{(V_0 T_s \cos^2 \epsilon + T_p \sin^2 \epsilon) + (T_p \cos^2 \epsilon + V_0 T_s \sin^2 \epsilon) \cdot E} \cdot \frac{(T_s \cos^2 \epsilon + T_p \sin^2 \epsilon) + (T_p \cos^2 \epsilon + T_s \sin^2 \epsilon) \cdot E}{(R_p \cos^2 \epsilon + R_s \sin^2 \epsilon) + (R_s \cos^2 \epsilon + R_p \sin^2 \epsilon) \cdot E}, \quad (9)$$

式中 E 为偏振片的消光比,且 $E = T_{\max}/T_{\min}$ 。显然,如果偏差角 $\epsilon = 0$,那么(9)式将等同于(4)式。采用前面仿真中同样的参数,结合(5)式和(6)式,当插入不同消光比的偏振片时,计算得到偏振分光系统的偏振分光误差随偏差角 ϵ 、入射光强度比 \bar{V}_0 的变化关系,如图 3 所示。从图 3 可以发现,当偏振片的消光比 $E = 1$ 时,偏振分光误差与偏差角 ϵ 无关。事实上,这是显然成立的。消光比 $E = 1$ 表示该偏振片对各个偏振方向的入射光的透射率都是相等的,偏差角 ϵ 的变化不会改变探测器得到的信号强度,因此偏差角 ϵ 对偏振分光

误差没有影响。将 $E = 1$ 代入(9)式可以发现,(9)式等同于(2)式,即相当于未添加偏振片的偏振分光系统。

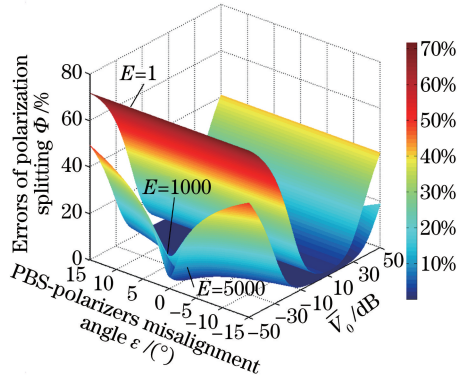


图 3 考虑 PBS 与偏振片之间存在偏差角时的偏振分光误差

Fig. 3 Polarizing beam splitting errors in terms of misalignment angles between PBS and polarizers

当偏振片的消光比 $E > 1$ 时,情况所有不同,偏振分光误差随着偏差角 ϵ 的增大而迅速增大。例如,利用仿真中的参数计算发现,对于由偏振片消光比 $E = 1000$ 构成的偏振分光系统,当入射光强度比为 -50 dB 时,偏振角 $\epsilon = 0^\circ$ 和 $\epsilon = 15^\circ$ 的偏振分光误差分别是 14% 和 49% 。然而,这依然远小于 $E = 1$ 时的误差 71% 。事实上,通常情况下光学器件的偏差角不会超过 15° 。因此,对于所述的偏振分光系统,即使偏振片透光轴与 PBS 入射面之间存在偏差角 ϵ ,但是考虑到一般情况下偏差角 ϵ 远小于 15° ,而偏振片的消光比 E 又普遍大于 1000 ,故该偏振分光系统依然可以显著减小偏振分光误差,提高偏振分光精度。图 3 所示的误差分析结果充分表明,减小偏差角 ϵ 以及增大偏振片的消光比 E 是进一步提高偏振分光精度的有效途径。

5 实验测量

前面通过理论计算和仿真分析,证明在 PBS 的反射通道和透射通道添加偏振片可以显著提高系统的偏振分光精度。为了研究所提出方法的可行性,进行了实验测试。如图 4 所示,激光从激光器出射,经准直扩束之后,入射到格兰-泰勒偏振棱镜,产生高偏振度的线偏振光。通过旋转半波片(HWP)改变线偏振光的偏振方向与 PBS 入射面的夹角,进而改变入射光中 S 光与 P 光的强度比 \bar{V}_0 。

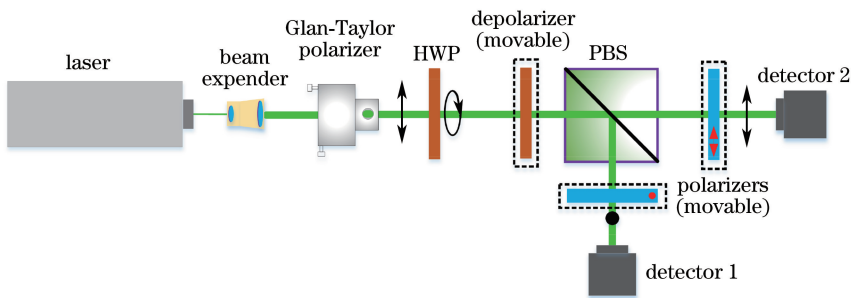


图 4 偏振分光测量系统

Fig. 4 Measurement system for polarizing beam splitting

测量仅由 PBS 构成的偏振分光系统。在 PBS 之前插入退偏器生成伪自然光,记录此时反射通道和透射通道探测器的强度比,完成系统定标过程。将退偏器移出光路,旋转半波片,使得反射通道中探测器 1 的强度最小。此时 PBS 的入射光的偏振方向与 PBS 入射面基本平行,入射光中 S 光的比例最小,即入射光强度比 \bar{V}_0 最小。记录此时两个探测器的强度值。以此为起始零点,以固定角度间隔旋转半波片,记录半波片的角度刻度值 θ_i ($0 \leq \theta_i \leq 45^\circ$) 以及探测器 1 和探测器 2 的强度值。当半波片旋转 45° 之后,入射光由 P 光变为 S 光,入射光强度比 \bar{V}_0 达到最大值。

在 PBS 的反射通道和透射通道各插入一片偏振片,并将反射通道偏振片的透光轴调整至垂直偏振方

向,将透射通道偏振片的透光轴调整至平行偏振方向。在 PBS 之前插入退偏器,完成系统定标,将退偏器移出光路。以相同角度 θ_i ($0 \leq \theta_i \leq 45^\circ$) 旋转半波片,分别记录两个通道探测器的强度。

最后将整个偏振分光系统移出光路,在半波片和探测器之间放置一块可旋转的格兰-泰勒偏振棱镜,如图 5 所示。当半波片位于每一个角度 θ_i ($0 \leq \theta_i \leq 45^\circ$) 时,旋转该格兰-泰勒偏振棱镜,记录探测器的最大光强 I_{\max} 和最小光强 I_{\min} ,得到半波片处于 θ_i 时出射光的消光比 $E_i = I_{\max}/I_{\min}$ 。实验发现,半波片出射光的消光比 E_i 会随着半波片旋转角 θ_i 的变化而波动,因此需要分别计算半波片处于每个角度 θ_i 时出射光(即偏振分光系统的入射光)的强度比

$$\bar{V}_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{1 - \frac{E_i - 1}{E_i + 1} \cos 4\theta_i}{1 + \frac{E_i - 1}{E_i + 1} \cos 4\theta_i} \right), \quad (10)$$

由(10)式可得到入射光强度比 \bar{V}_0 随半波片角度 θ_i 的变化曲线。

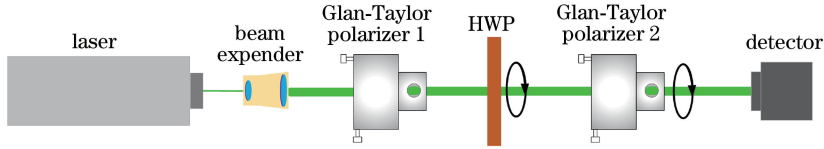


图 5 入射光强度比的测量系统

Fig. 5 Experimental system for measuring the intensity ratio of incident light

鉴于格兰-泰勒偏振棱镜的消光比极高(可达到 2×10^5),将其测得的入射光强度比 \bar{V}_0 作为参考值,其他测量结果与之比较,从而得到偏振分光误差。半波片旋转时,测得的反演强度比和偏振分光误差的变化曲线分别如图 6(a)和(b)所示。对比图 2 和图 6 可以发现,仿真结果和实验数据基本符合。当半波片的角度位于 22.5° 附近时,入射光中 S 光的强度与 P 光的强度相当,各偏振分光系统测得的反演强度比几乎一致,偏振分光误差较小;当半波片位于 0° 时,入射光是高偏振度的 P 光,由(10)式计算得到入射光的强度比 \bar{V}_0 约等于 -47.5 dB,而 PBS 和已添加偏振片的 PBS 测得的反演强度比分别为 -20.3 dB 和 -40.7 dB,其偏振分光误差分别为 57.3% 和 14.3% ;当半波片旋转至 45° 时,入射光是高偏振度的 S 光,由(10)式计算得到入射光的强度比 \bar{V}_0 约等于 47.8 dB,PBS 和已添加偏振片的 PBS 测得的反演强度比分别为 40.4 dB 和 43.7 dB,偏振分光误差分别为 15.5% 和 8.6% 。

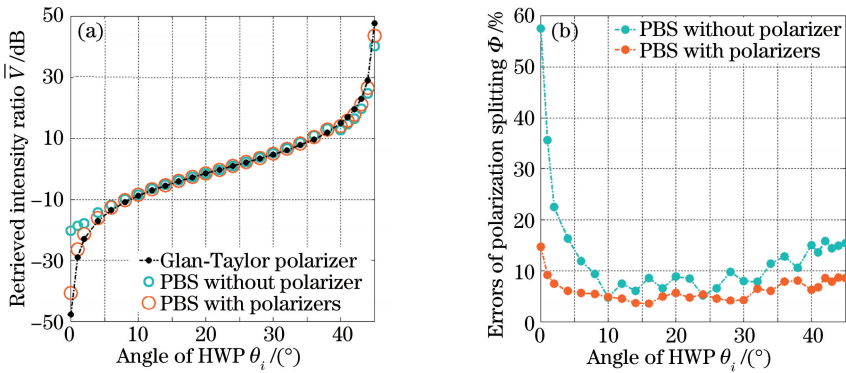


图 6 偏振分光实验结果。(a)反演强度比随半波片旋转角的变化曲线;(b)偏振分光误差随半波片旋转角的变化曲线

Fig. 6 Experimental results of polarizing beam splitting. (a) Relationship between retrieved intensity ratio and rotated angle of the HWP; (b) relationship between polarization beam splitting error and rotated angle of the HWP

实验结果充分表明,在 PBS 出射通道添加偏振片,可以显著提高偏振分光精度。另外,不管对于 PBS 还是由 PBS 和偏振片构成的偏振分光系统,半波片为 0° 时(入射光是高偏振度的 P 光)的偏振分光误差都明显大于半波片为 45° 时(入射光是高偏振度的 S 光)的误差,这说明实验中所用的 PBS 确实存在 $0 < T_s < R_p$,使得 P 光形成的偏振串扰大于 S 光形成的偏振串扰。一般情况下,在偏振激光雷达等光学系统中,发射激光是 P 光还是 S 光(相对于 PBS 的入射面)是可以自由选择的。根据上述分析结果,为了进一步提高偏振分光

精度,建议优先选择 S 光。最后需要指出的是,尽管半波片旋转角度的定位精度、光电探测器在大动态范围内(5 个数量级)的线性特性等可能会造成测量误差,但是这些误差源并不影响对比结果,因为这些误差源对于不同偏振分光系统的影响几乎是一致的。

需要强调的是,虽然常用的二向色型偏振片的消光比普遍大于 1000(对于 532 nm),这有助于提高偏振分光精度,但是其最大透射率一般低于 90%,这将降低偏振分光系统的光学效率。因此从理论上讲,所添加的偏振片的最大透射率越大,系统的光学效率越高;偏振片的最小透射率越小,越有利于提高系统的偏振分光精度。另外,有些系统对偏振分光器件的损伤阈值要求很高,因此所添加偏振片的损伤阈值也需要相应地提高。

6 结 论

PBS 广泛应用于偏振光学系统中。然而,一般 PBS 存在偏振串扰,会导致较大的偏振分光误差。提出在 PBS 的反射通道和透射通道添加偏振片,构成一种高精度的偏振分光系统。理论仿真和实验结果均表明,该偏振分光系统能够基本消除偏振串扰,大幅度提高偏振分光精度。提出的偏振分光系统简单实用,可广泛应用于偏振光学系统中。

参 考 文 献

- Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(11): 1562-1566.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟 志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1562-1566.
- Liu Liren. Synthetic aperture lidar (Ⅲ): circulated duplex telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1405-1410.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(Ⅲ): 双向环路发射接收望远镜[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1405-1410.
- Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.* Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- Alvarez J M, Vaughan M A, Hostetler C A, *et al.* Calibration technique for polarization-sensitive lidars[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(5): 683-699.
- Liu B, Wang Z. Improved calibration method for depolarization lidar measurement[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14583-14590.
- Freudenthaler V, Esselborn M, Wiegner M, *et al.* Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006[J]. Tellus B, 2009, 61(1): 165-179.
- Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.* Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.
伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- Pan Yubing, Lü Daren, Pan Weilin, *et al.* A case study of cirrus cloud over geermu city using two-wavelength polarization lidar[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(5): 581-588.
潘昱冰, 吕达仁, 潘蔚琳, 等. 地基双波长偏振激光雷达对格尔木地区卷云观测的个例研究[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(5): 581-588.
- Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1548-1553.
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1548-1553.
- Sassen K, Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing, part II: microphysical properties derived from lidar depolarization[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(15): 2103-2112.