

圆偏振光大气湍流模拟信道传输保偏特性实验研究

付强¹ 刘丹^{1*} 战俊彤² 张肃¹ 段锦³ 刘智³ 王小曼³ 姜会林¹

¹长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

³长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 偏振成像探测技术针对复杂环境中识别探测目标具有明显的优势和广阔的应用前景, 偏振大气信道环境下的传输特性尤为重要。采用平行平板间对流形式研制了大气湍流模拟装置, 在此基础上, 结合激光发射及偏振参数检测装置, 对湍流环境中激光偏振传输特性的变化规律进行实验研究, 结果表明线偏振光经过大气传输后会出现较明显的退偏现象, 而圆偏振光则表现为较弱的退偏现象, 且可很好的保持原有旋向继续传输, 另外, 强湍流比弱湍流对偏振传输影响大。该结果验证了圆偏振光在大气信道中传输保偏性能好。

关键词 物理光学; 圆偏振光; 大气湍流模拟; 信道传输; 保偏特性

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112601

Research on Circularly Polarized Characteristics by Experimental in Atmospheric Turbulence Simulation Channel

Fu Qiang¹ Liu Dan¹ Zhan Juntong² Zhang Su¹ Duan Jin³

Liu Zhi³ Wang Xiaoman³ Jiang Huilin¹

¹Fundamental Science for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory of Key, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Polarization imaging detection technology in the complicated environment on the recognition of target detection enjoys obvious advantages and broad prospects. Polarization properties of atmospheric transmission channel environment are particularly important. The parallel plates convection device is adopt to develop simulation of atmospheric turbulence. Based on this, experiments are conducted to study the change regularity of the polarization of laser transmission characteristics under turbulent environment, combined with the laser emission and polarization parameter detection device. The results show that linearly polarized light will appear obvious depolarization phenomenon passing through the atmosphere, but circularly polarized light shows weak depolarization phenomenon, which is very good to maintain the original rotation to continue transmission, and the strong turbulence affects more heavily than weak turbulence on the polarization transmission. The results prove circularly polarized light transmission polarization can maintain good performance in the atmospheric channel.

Key words physical optics; circularly polarized light; atmospheric turbulence simulation; transmission channel; polarization characteristic

OCIS codes 260.5430; 230.5440; 250.0250

1 引言

光的偏振包含大量有用信息, 准确地测量其偏振状态有很多应用价值。在增强沙尘和云雾中的可见度等

收稿日期: 2015-02-20; 收到修改稿日期: 2015-05-23; 网络出版日期: 2015-10-27

基金项目: 国家973计划、国家863计划、总装预研基金、吉林省科技攻关项目(20150204045GX)

作者简介: 付强(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光传输特性方面的研究。E-mail: cust_fuqiang@163.com

*通信联系人。E-mail: strich@sina.com

方面具有重大应用潜力^[1]。在观测不同光学属性方面,人眼可以识别色彩,却无法分辨从物体散射出的光的不同偏振差异^[2]。2012年,在美国空军科学研究办公室(AFSOR)资助下,由科罗拉多矿业学校(CSM)和ITN能源系统公司科研人员组成的研究团队研发出一种新型圆偏振滤光片,能够快速有效地探测出光的偏振状态。

偏振探测技术被重视,经大气传输的影响研究也越来越重要。2003年,Shirai等^[3]提出相干性和偏振性统一理论,该理论的优越性在于它可以预测随机电磁光束的大量未知特性在传输过程中的变化情况。相干性和偏振性统一理论的提出使得定量判断随机电磁光束在任何线性介质内传输过程中其相干度、偏振度及频谱变化情况成为可能^[4-9]。

偏振传输特性的理论分析取得了一些成果,但实验研究相对较少。本文开展了基于室内大气湍流模拟装置的原偏振传输特性实验,测量圆偏振传输的偏振特性变化规律等,以期获得实验验证。

2 偏振传输特性及湍流模拟装置

2.1 偏振传输特性

随机电磁光束的谱偏振度表示为

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \sqrt{1 - \frac{4\text{Det}\mathbf{W}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega)}{[\text{Tr}\mathbf{W}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega)]^2}}, \quad (1)$$

式中 Det 表示求矩阵的行列式, $\mathbf{W}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega)$ 为距离为 \mathbf{r} , 交角为 ω 的两点间交叉谱密度矩阵。

对于柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)湍流模型有

$$\begin{cases} T = 0.98(C_n^2)^{\frac{6}{5}} k^{\frac{2}{5}} \sigma^{-2} \\ m = \frac{16}{5} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 T 为湍流影响程度, C_n^2 为大气折射率结构常数, k 为波数, σ 为闪烁方差, m 为常数。

光束在湍流环境中传输,任意点 (ρ, z) 处的偏振度为

$$P = \frac{\sqrt{\left\{ \frac{A_x^2}{\Delta_{xx}^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \Delta_{xx}^2(z)}\right] - \frac{A_y^2}{\Delta_{yy}^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \Delta_{yy}^2(z)}\right] \right\}^2 + \frac{4A_x^2 A_y^2 |B_{xy}|^2}{\Delta_{xy}^4(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \Delta_{xy}^2(z)}\right]}}{\frac{A_x^2}{\Delta_{xx}^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \Delta_{xx}^2(z)}\right] + \frac{A_y^2}{\Delta_{yy}^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2 \Delta_{yy}^2(z)}\right]}, \quad (3)$$

式中 (ρ, z) 为极坐标点, A_i^2 和 Δ_j^2 为与位置无关但与光频率有关的参数。

2.2 大气湍流模拟原理及装置

要模拟大气湍流的光学特性,其基本原理为流动的相似性,即当流动具有相似的几何边界条件,且雷诺数相同,那么即使尺寸的大小或者速度不同,甚至流体本身不同,它们在动力上都是相似的。大气湍流模拟装置闭环自动控制系统可有效控制湍流强度^[6-8]。表征光学湍流强度的大气相干长度 r_0 和光路上的温度起伏强度有关,其关系可由光传输理论得到。而温度起伏强度完全决定于湍流模拟装置加热面和冷却面的温度差,只要湍流模拟装置的结构不变,这个温度差和大气相干长度 r_0 的关系就不会改变。温度差主要由加热的功率来控制,因此,可以通过控制加热功率,维持一个给定的温度差,从而得到需要的湍流强度。另外湍流参数测量系统可测量表征湍流特性的关键指标。

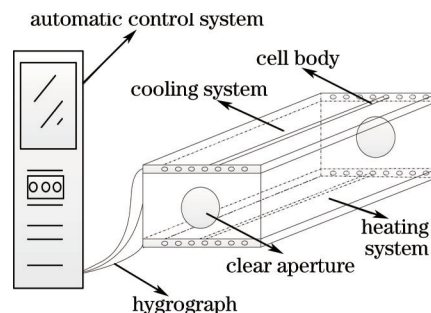


图1 大气湍流模拟装置基本结构

Fig.1 Basic structure of atmospheric turbulence simulator

基于以上原理,大气湍流模拟装置采用平行平板间对流形式,其基本结构如图1所示。

大气湍流模拟装置的主要部分包括池体、加热系统、冷却系统、自动控制系统。池底平板为加热面板,池顶平板为水冷箱,池体两端为直径20 cm的透光孔;加热系统通电使加热面板温度均匀分布,并有足够高的温度,以产生足够强的湍流。冷却系统通过自来水双向流动,使水冷箱温度分布均匀,保持恒温。池体由耐高温隔热板作为保温材料,减少装置侧面与外界的热交换。窗口为平面透镜,光学玻璃材质,厚度为10 mm,直径为200 mm。自动控制系统通过控制加热电功率,控制加热面和冷却面的温度差,从而达到所需的大气相干长度。大气湍流模拟装置的湍流强度采用到达角起伏法进行定标,并以大气相干长度 r_0 值大小来表征湍流的强弱。大气相干长度 r_0 与光束到达角起伏方差的关系为

$$r_0 = 3.18D^{-1/5}k^{-6/5}\langle\alpha^2\rangle^{-3/5}, \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长 D 为透镜直径, $\langle\alpha^2\rangle$ 为到达角起伏方差。

系统工作时,首先通过自动控制系统计算机界面输入要模拟的大气湍流参数,池体上下平行平板间温度差 ΔT 或描述大气湍流强弱的参数大气相干长度 r_0 ,经测试标定,该系统可模拟的大气相干长度范围为1~40 cm。当输入大气相干长度 r_0 参数时,计算机自动将其换成对应的温度差,自动控制系统总控软件自动计算所需加热功率,然后控制加热系统开始工作,测温系统实时采集装置各部分实际温差,并进行实时调整直至形成稳定的、预设的模拟湍流。大气湍流模拟装置及自动控制系统实物如图2所示。



图2 大气湍流模拟装置及自动控制系统

Fig.2 Atmospheric turbulence simulation device and control system

3 激光偏振传输特性测试系统组成

在室内大气湍流模拟装置基础上,结合激光发射及偏振参数检测装置,对湍流环境中激光偏振传输特性的变化规律进行实验研究。

系统原理框图如3所示,该实验系统由激光发射端、大气湍流模拟装置和偏振参数测量系统三部分组成。发射光束的偏振特性由偏振控制组件进行调节、控制,以获得不同初始偏振参数,再经发射光学系统进行扩束、准直,压缩束散角后进入大气湍流模拟装置,在接收端再由接收光学系统进行缩束、整形,最后由偏振态测量仪对光束的偏振参数进行实时监测并记录。其中,偏振控制组件由起偏片和1/4波片共同组成。同时,实验过程中大气湍流模拟装置的参数设置及变化情况也需要实时监测、记录,以便数据处理过程中监测结果与监测环境相对应。图4给出了相位差 δ 取不同值时光波偏振态的几何示意图。

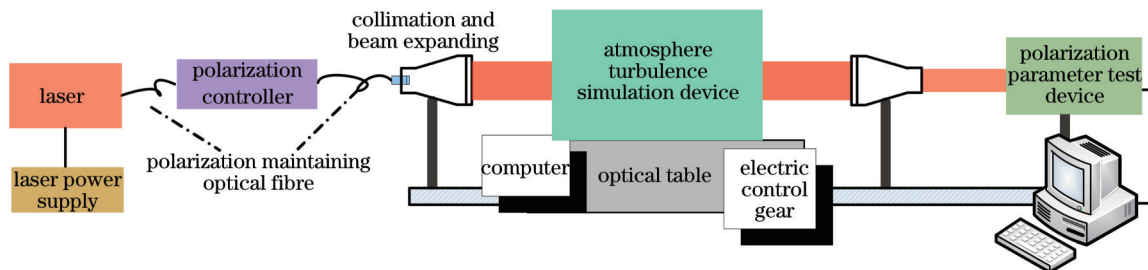


图3 湍流环境下激光偏振传输特性实验系统原理框图

Fig.3 Laser polarization transmission properties under the turbulent environment experiment system schematic diagram

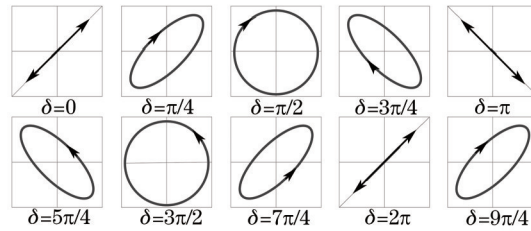


图4 δ 为各种值时的偏振光几何示意图

Fig.4 Geometric sketch of polarized light under different values of δ

采用 1550 nm 波段激光进行测试。图 5 分别给出了发射端和接收端的实物照片。

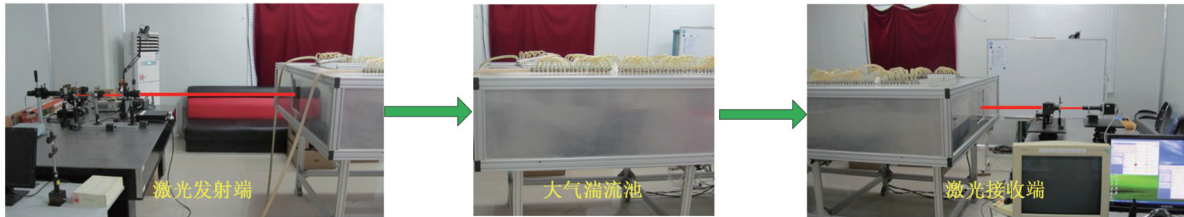


图5 湍流环境下激光偏振传输特性实验系统

Fig.5 System of laser polarization transmission in turbulence

4 实验结果

实验中,激光光源波长为 1550 nm,方位角 $\theta = 90^\circ$ 的垂直线偏振光和左旋圆偏振光,实验中要得到标准的圆偏振光难度较大,故选用椭圆率角 $e = -45^\circ$ 的左旋椭圆偏振光为研究对象,对其经过湍流模拟装置传输后偏振态变化情况进行实验研究。

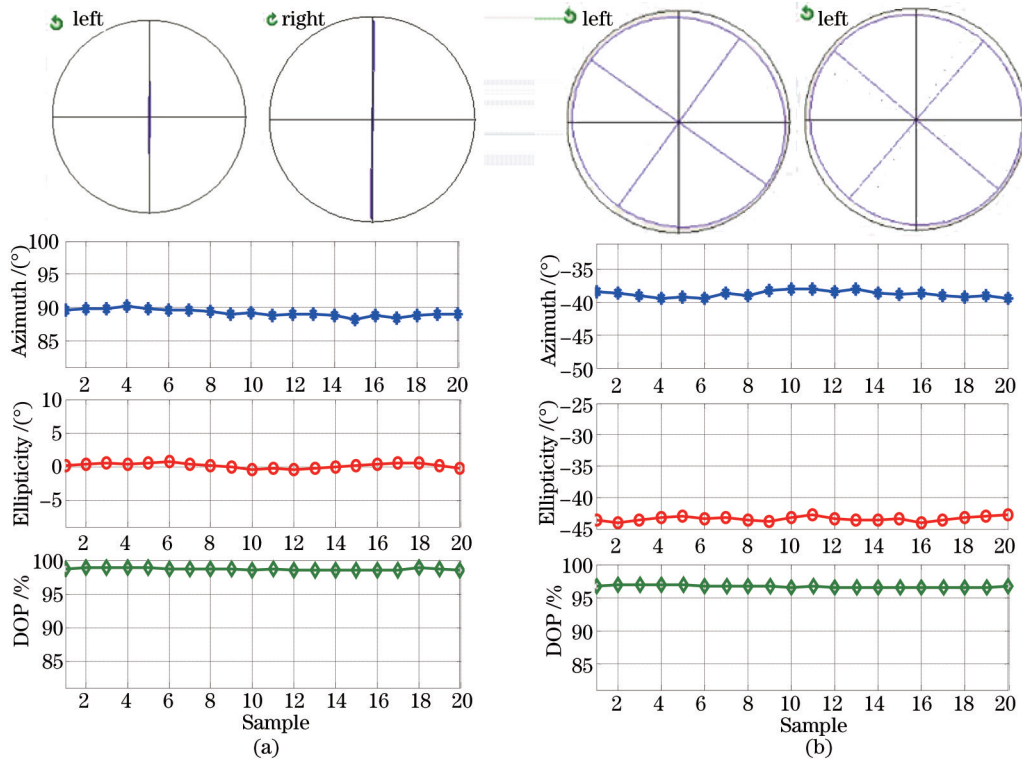


图6 $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 条件下的激光传输偏振特性情况。(a) 线偏振光; (b) 左旋圆偏振光

Fig.6 Characteristic of laser transmission polarization under $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

(a) Linear polarization; (b) left handed circular polarization

图 6 给出了 $\Delta T = 60^\circ\text{C}$, 等效于大气相干长度 $r_0 = 7.5\text{ cm}$ 条件下, 线偏振光和左旋圆偏振光通过湍流环境

后的偏振特性变化情况的实验结果。图7给出了 $\Delta T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，等效于大气相干长度 $r_0 = 1\text{ cm}$ 条件下，线偏振光和左旋圆偏振光通过湍流环境后的偏振特性变化情况的实验结果。数据采样间隔均为 1 min 。

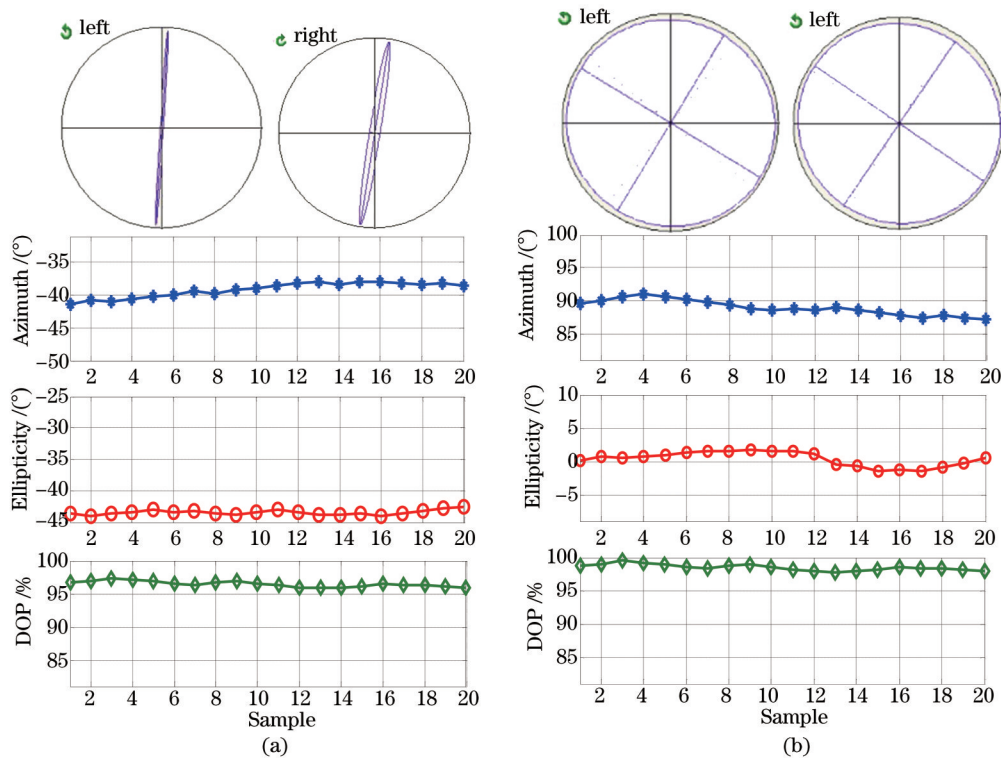


图7 $\Delta T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的激光传输偏振特性情况。(a) 线偏振光; (b) 左旋圆偏振光

Fig.7 Characteristic of laser transmission polarization under $\Delta T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(a) Linear polarization; (b) left handed circular polarization

观察实验结果,可以看出,线偏振激光经过大气中传输之后,受大气湍流影响,表征其偏振态(Azimuth和Ellipticity)和偏振度(DOP)的参数均产生随机变化,且随着湍流强度的提高,变化更加明显。而对于圆偏振光来说,受湍流环境的影响,表征其偏振态和偏振度的参数也发生了变化,具体表现为圆偏振光在传输过程中方位角发生随机转动。对于实验中的左旋圆偏振光来说,圆偏振光的长、短轴近似相等,所以,此时方位角的随机转动对圆偏振光的偏振特性影响很小。此外,还可以看出,实验中的左旋圆偏振光在传输过程中其旋向(左旋)始终保持不变($e < 0$)。目前一般采用圆偏振光传输的系统,大多采用旋向这一参数来对不同偏振态的光波进行描述和判别,所以说圆偏振光通过湍流环境可很好的保持原有旋向继续传输,更有利于通信系统对传输信息的探测、解调。

通过对以上实验的采样数据进行统计处理,得到两种偏振态光束在不同湍流环境下表征其偏振态和偏振度的参数的波动情况如表1所示。

表1 线偏振光和圆偏振光不同湍流条件下的偏振参数波动情况

Table 1 Polarized parameter fluctuation of linear and circular polarization light under different turbulence conditions

Turbulent environment	Polarization	Azimuth	Ellipticity	DOP
$\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $r_0 = 7.5\text{ cm}$	Line polarization	2.311%	2.012%	0.832%
	Left handed circular polarization	1.515%	1.365%	0.521%
$\Delta T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $r_0 = 1\text{ cm}$	Line polarization	3.323%	3.126%	1.513%
	Left handed circular polarization	1.583%	1.579%	1.132%

可以看出,在相同传输条件下,相对线偏振光来说圆偏振光的退偏效果较弱,且随着湍流强度的提高,影响越严重,但整体变化水平不明显。

5 结 论

激光经过实际大气信道传输后,由于大气湍流的闪烁、折射、散射、偏折等影响,可能造成激光信号的波前失真,引起光斑的强度起伏和光束质心漂移,且随着距离的增加影响会越来越明显;而对偏振态的影响则有所不同,线偏振光经过大气传输后会出现较明显的退偏现象,而圆偏振光则表现为较弱的退偏现象,且可很好的保持原有旋向继续传输。

圆偏振光在大气信道中传输具有不可逾越的优势,因此,在大气激光通信系统、偏振成像探测系统中引入考虑圆偏振以减小大气对激光通信过程的影响,提高系统的探测信噪比等性能指标。

参 考 文 献

- 1 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505004.
翟超, 武风, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505004.
- 2 Sun Haiyue, Wu Wuming, Jin Aijun, *et al.*. Propagation performance of supercontinuum source in non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0413001.
孙海跃, 吴武明, 靳爱军, 等. 非科尔莫哥罗夫湍流下超连续谱光源的传输特性[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0413001.
- 3 Shirai T, Aristide D, Wolf E. Directionality of Gaussian Schel-I model beams propagating in atmospheric turbulence[J]. Opt Lett, 2003, 28(8): 610-612.
- 4 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated partially coherent cosh-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502008.
陶汝茂, 司磊, 马阎星, 等. 截断部分相干双曲余弦高斯光束在非Kolmogorov湍流中的传输[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502008.
- 5 L Mandel, E Wolf. Optical Coherence and Quantum Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 163-171.
- 6 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- 7 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 241-245.
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 241-245.
- 8 Liu Qi, Zhu Jinkui, Wang Ke, *et al.*. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301004.
刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301004.
- 9 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Research on the polarization blind zone of the fiber squeezer polarization controller[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5):0506001.
张启业, 朱勇, 苏洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506001.

栏目编辑: 史敏