

光纤中偏振稳定控制的实验研究

张晓光^{1,2} 方光青^{1,2} 赵鑫媛^{1,2} 王少康^{1,2}

(¹ 北京邮电大学光通信与光电子研究所, 北京 100876
² 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 研制了一种偏振稳定系统, 可以使偏振态(SOP)保持稳定输出, 而且可以是任意需要的偏振态。实验中扰偏器以不同变化频率、各种相位幅度的信号变化, 稳定器对其进行偏振稳定实验, 对于相位幅度为 $\pi/2$ 的扰偏信号, 进行稳定的变化频率可达 8 kHz。稳定耗时分析表明, 有 71% 的时间耗在偏振控制器的响应时间上, 而稳定算法及数据处理仅占总耗时的 8%。

关键词 光通信; 偏振态; 偏振控制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0888

Experimental Research of Polarization Stabilization in Optical Fiber Communication Systems

Zhang Xiaoguang^{1,2} Fang Guangqing^{1,2} Zhao Xinyuan^{1,2} Wang Shaokang^{1,2}

¹Institute of Optical Communications and Optoelectronics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

²Key Laboratory of Optical Communications and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing 100876, China

Abstract This paper reports an achievement of a novel polarization stabilization system, which can realize the stable states of polarization (SOP) output, especially any output stable SOP you want. The experiments were done for the cases including different varying frequencies and phase amplitudes generated by a polarization scrambler. The stabilizations of SOP can be realized up to 8 kHz for the peak-to-peak $\pi/2$ scramble signals. The analysis of time-consuming distribution showed that the polarization controller occupied 71% of the total time, while the stable algorithm and data processing only occupied 8%.

Key words optical communications; state of polarization (SOP); polarization stabilization

1 引言

光纤通信中光信号的偏振态(SOP)控制是一个重要的研究方向, 也是一个研究难点。光纤中的偏振控制最早来源于相干光通信, 相干接收机要求本振激光信号与接收信号之间偏振态保持一致, 便于相干接收^[1,2]。但是由于光纤传输中, 光纤的移动与振动造成光信号偏振态的扰动, 因此跟踪、稳定控制信号的偏振态是不可缺少的。近年来为了提高频谱效率, 正交相位调制码型联合偏振复用引起人们的广泛关注^[3], 其中解复用的偏振匹配是一个难点, 需要不间断地跟踪稳定信号的正交偏振态, 并匹配

地耦合入解复用分束器。本文介绍一种实时稳定控制输出偏振态的实验方法。

2 偏振控制的理论与实验

光纤中光信号的偏振态可以用在线偏振测量仪(Inline-polarimeter)测量其斯托克斯参量。斯托克斯参量定义为^[4]

$$S_0 = \langle |E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2 \rangle = I_x + I_y,$$

$$S_1 = \langle |E_x(t)|^2 - |E_y(t)|^2 \rangle = I_x - I_y,$$

$$S_2 = 2\langle |E_x(t)E_y(t)| \cos \delta \rangle = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ},$$

$$S_3 = 2\langle |E_x(t)E_y(t)| \sin \delta \rangle = I_{Q,-45^\circ} - I_{Q,+45^\circ},$$

(1)

收稿日期: 2008-08-08; 收到修改稿日期: 2008-10-26

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z224)和北京市教育委员会共建项目(XK100130737)资助课题。

作者简介: 张晓光(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

其中 I_x 与 I_y 表示坐标系中 x 与 y 方向的光强分量,即光信号分别通过透振方向为 x 与 y 方向的检偏器的光强; I_{+45° 与 I_{-45° 分别表示通过透振方向为 $\pm 45^\circ$ 方位角检偏器的光强分量; $I_{Q,-45^\circ}$ 与 $I_{Q,+45^\circ}$ 分别表示先通过一个 $\lambda/4$ 波片,再通过透振方向为 $\pm 45^\circ$ 方位角检偏器的光强分量。 δ 表示电场强度 y 方向分量相对于 x 方向分量的相位差, $\langle \rangle$ 表示时间平均值。其中 S_0 代表总光强。

典型的偏振测量仪的原理图如图 1 所示,可以同时给出四个斯托克斯参量。

假如光信号经过传输在接收端的偏振态为 (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3) ,由于传输中的某些扰动,使得接收端偏振态 (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3) 不断变化。将一个偏

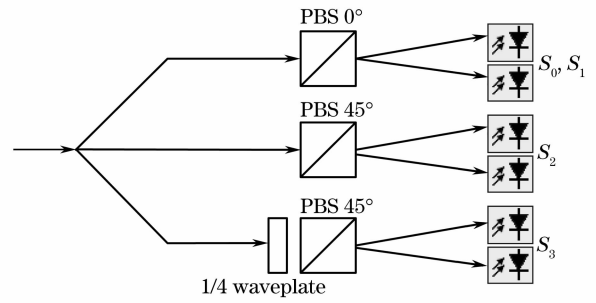


图 1 偏振测量仪的原理图

Fig. 1 Configuration of a polarimeter

振稳定器放置在接收端前面,将偏振态实时地稳定在所要的 (S_0, S_1, S_2, S_3) 。实验采用一种反馈方式实现偏振稳定,装置如图 2 所示。

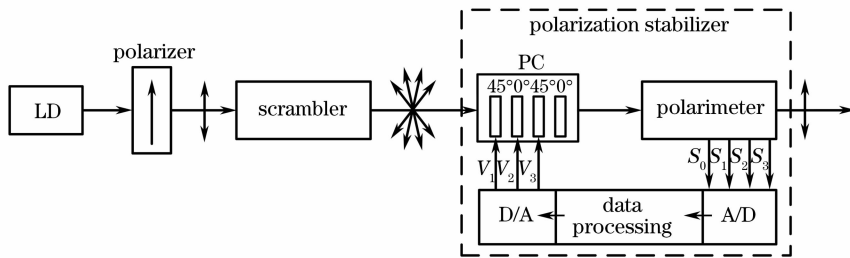


图 2 偏振稳定实验系统

Fig. 2 Experimental setup for polarization stabilization

激光器 LD 经过起偏器,保证输入一个稳定的线偏振光。用一个扰偏器产生不断变化的偏振态。虚框内采用反馈式偏振稳定器,利用一个在线偏振仪实时监测偏振态的变化,将监测到的偏振信息作为反馈信号,通过算法数据处理,产生一组控制电压不断控制偏振控制器(PC),使输出的偏振态达到稳定。

假设要输出稳定的偏振态为 (S_1, S_2, S_3) (对于完全偏振光,满足 $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = S_0^2$,因此三个参数 S_1, S_2, S_3 就可以描述偏振态),建立一个具有单凸最大值的函数 $F[(S_1 - S'_1)^2, (S_2 - S'_2)^2, (S_3 - S'_3)^2]$,其中 (S'_1, S'_2, S'_3) 是检偏仪监测到的当前的偏振态,当 $S'_1 = S_1, S'_2 = S_2, S'_3 = S_3$ 时,函数 F 达到最大值。利用某种搜索优化算法,调整控制电压 (V_1, V_2, V_3) ,使函数 F 达到并保持全局最大值,就可以保持输出 (S_1, S_2, S_3) 的稳定偏振态。数学描述为

$$\text{MAX}_{V_1, V_2, V_3} F[(S_1 - S'_1)^2, (S_2 - S'_2)^2, (S_3 - S'_3)^2]. \tag{2}$$

文献[5,6]成功地将粒子数优化算法(PSO)应用于偏振模色散的补偿。本实验成功地将 PSO 算法引入偏振态的稳定。

对扰偏器施加不同频率、不同电压幅度的三角波,可以控制输入偏振态变化的快慢与大小。利用扰偏器产生了相位幅度分别为 $\pi/4, \pi/2, \pi$,变化频率分别为 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz 的不稳定偏振态,计划利用反馈偏振稳定器将输出偏振态稳定在斯托克斯参量为 $(1, 0, 0)$ 的水平线偏振态上。实验结果发现,在现有的硬件环境下,对于相位幅度为 $\pi/4$,变化频率达 8 kHz 的不稳定偏振态,经过稳定以后,其斯托克斯参量偏离 $(1, 0, 0)$ 的标准偏差 σ 小

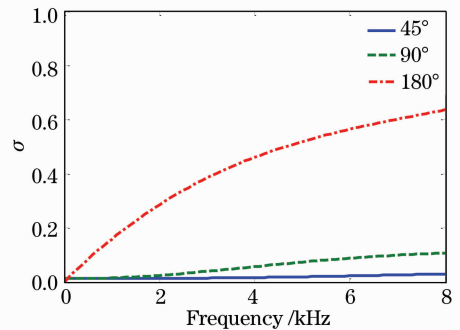
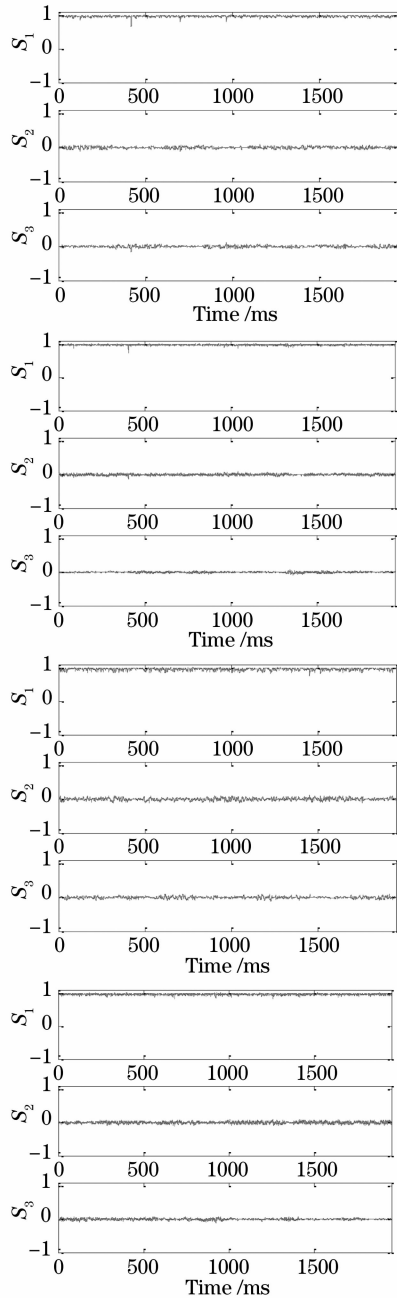


图 3 不同变化频率的不稳定偏振态,经过稳定器后,输出的偏振态偏离预定的 $(1, 0, 0)$ 的标准偏差

Fig. 3 Standard deviation σ of Stokes parameters differing from designed output stabilized SOP $(1, 0, 0)$ versus variation frequencies of input unstable SOPs

于 0.05。而对于相位幅度为 $\pi/2$, 变化频率达 8 kHz 的不稳定偏振态, 经过稳定以后, 其斯托克斯参量偏离 $(1, 0, 0)$ 的标准偏差 σ 小于 0.1。对于相位幅度大于 π 的变化偏振态, 以目前器件的响应速度, 稳定器稳定效果不佳, 结果如图 3 所示。

图 4 为相位幅度为 $\pi/2$, 变化频率分别为 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz 和 8 kHz 输入不稳定偏振态, 稳定到 $(1, 0, 0)$ 的情况。左边一列图是稳定后输出



偏振态的斯托克斯参量随时间变化的情况, 右边一列图是相应的输出偏振态在庞加球上的输出位置。输出偏振态基本稳定在 $(1, 0, 0)$ 的位置上, 达到了实时稳定偏振态的目标。

该偏振稳定器还可以将输出光稳定在其他所要的偏振态上, 不只限定在 $(1, 0, 0)$, 只要在 (2) 式中输入所需的偏振态 (S_1, S_2, S_3) 即可, 比如说 $(0, 0, 1)$ 的右圆偏振态。

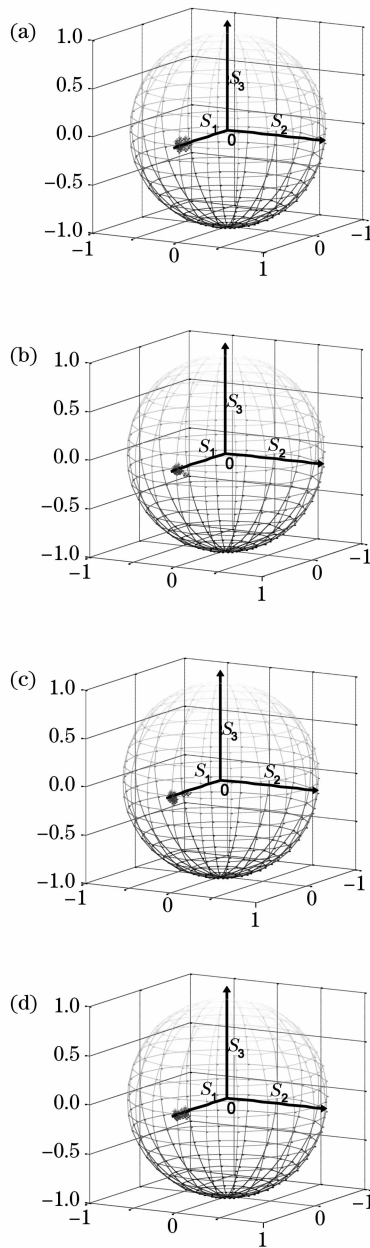


图 4 扰偏器输出偏振态变化幅度为 $\pi/2$, 变化频率分别为 (a) 1 kHz; (b) 2 kHz; (c) 4 kHz; (d) 8 kHz, 经过稳偏后输出的偏振态的斯托克斯参量与庞加莱球上的输出点

Fig. 4 Stabilized output SOPs shown in Stokes parameters and points on Poincaré sphere when input SOPs have phase amplitude of $\pi/2$, and variation frequencies of (a) 1 kHz; (b) 2 kHz; (c) 4 kHz and (d) 8 kHz, respectively

对于偏振稳定器实验装置的软硬件系统,还进行了耗时分析,如图 5 所示。可以看出,偏振控制器(PolarRITE II, General Photonics Co.)响应比较慢,占总耗时的 71%,数据采集卡的 A/D 与 D/A 转换速度也不快,占总耗时的 21%,而数据处理及算法部分耗时很少,仅占 8%。因此硬件部分是实验的瓶颈,只要有响应速度更快的偏振控制器与数据采集卡,所设计的偏振稳定器会有更好的表现。对于变化速度更快、相位幅度变化更大(大于 π 的幅度)的输入偏振态,该稳定器都能处理得很好。

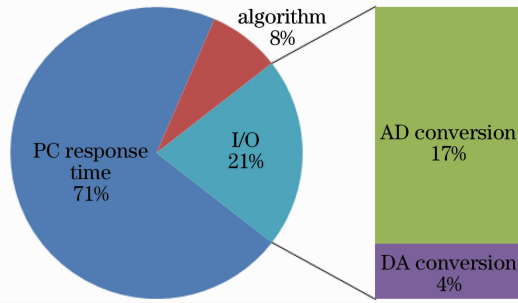


图 5 偏振稳定系统的软硬件耗时分析

Fig. 5 Analysis of time-consuming soft- and hardwares for the polarization stabilization system

3 结 论

设计了一种反馈式偏振稳定器,可以将偏振态

不稳定的光信号稳定在预先设定的偏振态上。在现有的条件下,实现了相位幅度达 $\pi/2$,变化频率达 8 kHz 的变化偏振态的稳定,偏差小于 0.1。耗时分析表明,实验室现有硬件耗去了约 92% 的时间。对于响应速度更快的偏振控制器与 A/D、D/A 板卡,该偏振稳定器表现会更好。

参 考 文 献

- 1 R. Noé, H. Heidrich, D. Hoffmann. Endless polarization control systems for coherent optics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1199~1208
- 2 N. G. Walker, G. R. Walker. Polarization control for coherent communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(3): 438~458
- 3 S. Bhandare, D. Sandel, B. Milivojevic *et al.*. 5.94 Tbit/s, 1.49 bit/s/Hz ($40 \times 2 \times 2 \times 40$ Gbit/s) RZ-DQPSK polarization division multiplex C-band transmission over 324 km[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 914~916
- 4 E. Collett. Polarized Light-Fundamentals and Applications[M]. Marcel Dekker, 1993
- 5 X. Zhang, L. Yu, Y. Zheng *et al.*. Two-stage adaptive PMD compensation in a 10 Gbit/s optical communication system using particle swarm optimization algorithm[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1~6): 233~242
- 6 X. Zhang, Y. Zheng, Y. Shen *et al.*. Particle swarm optimization used as a control algorithm for adaptive PMD compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 85~87