

相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究

马兵斌*, 柯熙政, 张颖

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 在相干光通信系统中,由于大气湍流的影响,信号光的偏振态具有不确定性,而光混频器对信号光和本振光的偏振态比较敏感。结合光混频器原理推导出信号光偏振态、中频信号和混频效率三者之间的关系,以中频信号幅值作为反馈控制信号光偏振态以提高混频效率,并设计一种适用于相干光通信系统的单粒子优化算法。实验结果表明,在闭环状态下,偏振控制系统中频信号的幅值快速增大,混频效率提升 64% 左右,中频信号幅值的波动方差减小为 0.001,实现了相干光通信系统中的偏振控制。

关键词 光通信; 相干光通信; 偏振控制; 单粒子优化算法; 混频效率; 中频信号

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0106002

Polarization Control and Control Algorithm of Beams in Coherent Optical Communication System

Ma Bingbin*, Ke Xizheng, Zhang Ying

*Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract In coherent optical communication system, the polarization state of the signal light is uncertain because of the influence of atmospheric turbulence, and the optical mixer is sensitive to the polarization of signal light and local oscillator light. Based on the principle of optical mixer, the relationship among the polarization state of the signal light, the intermediate frequency signal and the mixing efficiency is deduced, The amplitude of the intermediate frequency signal is used as feedback control signal to increase the mixing efficiency, and a single particle optimization algorithm for coherent optical communication systems is designed. Experimental results show that in closed loop state, the amplitude of the intermediate frequency signal increases rapidly, the mixing efficiency increases about 64%, and the fluctuation variance of amplitude of intermediate frequency signal decreases to 0.001. The polarization control in the coherent optical communication system is realized.

Key words optical communications; coherent optical communication; polarization control; single particle optimization algorithm; mixing efficiency; intermediate frequency signal

OCIS codes 060.1660; 030.7060; 060.2420; 060.2605

1 引 言

相干光通信因高的接收灵敏度、出色的频谱效率和最远的传输距离而成为下一代最有前途的光通信系统之一^[1-2]。信号光(S)和本振光(LO)在接收端进行相干混频时,混频器对信号光和本振光的偏振态比较敏感。由本振激光器发出的本振光源是一束稳定的偏振光,而在通过大气和光学系统后信号光的偏振态会发生改变^[3-4]。因此,到达混频器时信

号光的偏振态具有不确定性,并且由温度所引起的光纤双折射效应也会使信号光的偏振态发生缓慢漂移^[5-7]。为了获得较高的混频效率,在相干光通信系统中必须对信号光的偏振态进行控制^[8-10]。

偏振控制属于多极值优化问题^[10],常用的偏振控制算法^[11-15]有模拟退火算法(SAA)^[11]、粒子群算法(PSO)^[12]、遗传算法(GA)^[13]等。本文针对以上算法的不足之处,结合遗传算法里变异的概念和粒子群算法速度更新公式有较快收敛速度的优点,设

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-08-13; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61377080,60977054)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

* E-mail: 1287653285@qq.com

计一种优化算法——单粒子优化(SPO)算法,使用该算法来实现相干光通信系统中的偏振控制,提高混频效率,通过偏振控制系统建模仿真验证算法的性能,并使用该算法完成相干光通信系统中对信号光偏振态的控制。

2 偏振控制系统及原理

2.1 偏振控制系统

图 1 为包含偏振控制系统的相干检测原理图,偏振控制系统一般包括偏振控制器、检测模块和数据处理模块。在相干光通信中,通过理论分析中频信号幅值也能反映信号光的偏振信息。因此,图 1 中只有偏振控制器和数据处理模块两部分,偏振控

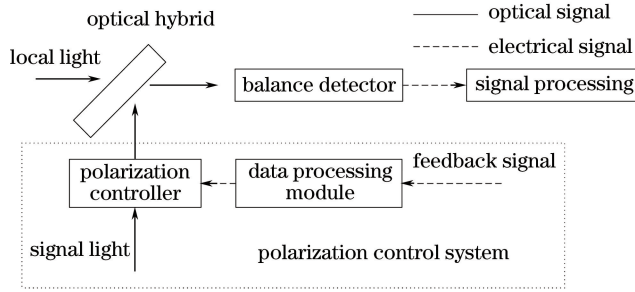


图 1 相干检测原理图

Fig. 1 Schematic of coherent detection

图 2 为偏振控制器 PolaRITE III 示意图,偏振控制器是由 0° 、 45° 、 0° 三个互成 45° 的光纤挤压器组成,通过控制偏振控制器三个通道的电压 U_1 、 U_2 、 U_3 产生力 F_1 、 F_2 、 F_3 ,研究表明光纤所受压力 F 与

产生的双折射相位差 γ 之间的关系可表示为^[17]

$$\gamma = KF/d, \quad (1)$$

式中, F 为光纤横截面上所受的力, d 为光纤直径,常数 $K = 9.5 \times 10^{-5}$ rad/m。

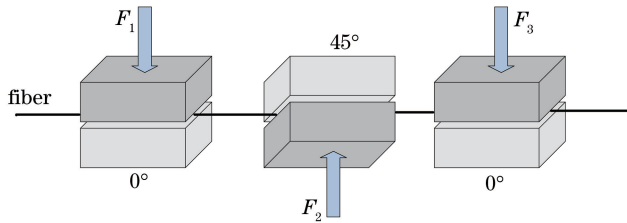


图 2 偏振控制器 PolaRITE III 示意图

Fig. 2 Schematic of polarization controller PolaRITE III

使用琼斯矩阵来描述偏振控制器和混频器的工作原理,则当光纤受到与 x 轴方向成 θ 角的压力 F

时,挤压光纤对输入信号光偏振态改变的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + i\cos 2\theta\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) & i\sin 2\theta\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ i\sin 2\theta\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) & \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - i\cos 2\theta\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

0° 和 45° 光纤挤压器的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{J}(0^\circ, \gamma) = \begin{bmatrix} \exp\left(i \frac{\gamma}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i \frac{\gamma}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}(45^\circ, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) & i \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ i \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) & \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

设信号光偏振态的琼斯矢量为 \mathbf{E}_s , 则通过该偏振控制器之后, 信号光的偏振态 \mathbf{E}'_s 可以表示为

$$\mathbf{E}'_s = \mathbf{J}(0^\circ, \gamma_3) \mathbf{J}(45^\circ, \gamma_2) \mathbf{J}(0^\circ, \gamma_1) \mathbf{E}_s, \quad (5)$$

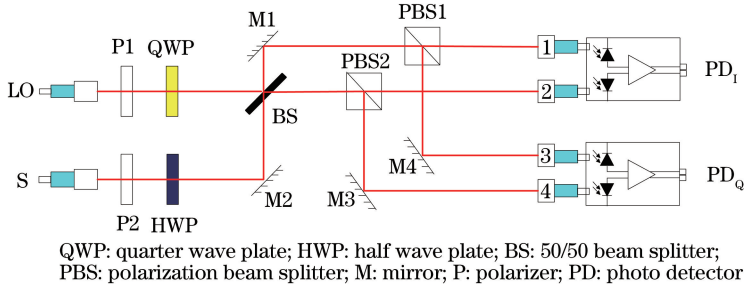


图 3 混频器的光路图

Fig. 3 Optical path of mixer

而信号激光器发出的偏振光会通过大气以及各种光学器件, 到达混频器前端的信号光一般是一束偏振特性不确定的偏振光, 信号光的琼斯矢量可表示为

$$\mathbf{E}_s = \sqrt{I_s} \exp[i\omega_s t + i\phi(t)] \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cdot \exp(i\varphi_s) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中: I_s 为信号光的光强; ω_s 为信号光角频率; ϕ 为信号光的调制相位; $\tan \alpha = E_{sy}/E_{sx}$, E_{sy} 、 E_{sx} 分别为偏振光在 y 方向与 x 方向上电矢量的分振幅, $\alpha \in [0, \pi/2]$; $\varphi_s = \varphi_{sy} - \varphi_{sx}$, 为偏振光在 y 方向与 x 方向上电矢量的相位差, $\varphi_s \in [-\pi, \pi]$ 。

信号光和本振光通过混频之后由平衡探测器输出的 I、Q 两路电信号分别为

$$E_I = \sqrt{I_{LO} I_s / 2} \cdot \cos \alpha \cdot \sin[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)], \quad (8)$$

$$E_Q = \sqrt{I_{LO} I_s / 2} \cdot \cos \alpha \cdot \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)]. \quad (9)$$

则光电流、电信号和混频效率 η 可以表示为

$$E = E_I + E_Q = \sqrt{I_{LO} I_s} \cos \alpha \sin[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t) + \pi/4], \quad (10)$$

式中 γ_3 、 γ_2 、 γ_1 分别为挤压光纤所产生的相移。在文献[18]中已经证明: 为了能够满足任意输入偏振态到任意输出偏振态的改变, 至少需要三个光纤挤压器的级联。

2.3 光混频器

图 3 为混频器的光路图, 设由本振激光器发出的本振光为一束沿 x 轴振动的稳定线偏振光, 光强为 I_{LO} , 则本振光的琼斯矢量可表示为

$$\mathbf{E}_{LO} = \sqrt{I_{LO}} \exp(i\omega_{LO} t) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 ω_{LO} 为本振光角频率。

$$\eta = E_{\text{actual}}^2 / E_{\text{ideal}}^2 = \cos^2 \alpha. \quad (11)$$

由(11)式可知 $\eta \in [0, 1]$, 为了实现相干光通信系统的高效率混频, 必须控制 $\alpha = 0$ 时信号光为沿 x 轴的线偏光, 混频效率最高 ($\eta = 1$)。

由(8)和(9)式可知, 中频信号的幅值由 I_{LO} 、 I_s 和 α 共同决定, 本振激光器发出的本振光是一束稳定的偏振光源, 即 I_{LO} 一定。信号光光强 I_s 和 α 都会直接影响中频信号的幅值, 因此在不检测信号光偏振态的情况下, 中频信号的幅值也能反映信号光偏振态的信息, 可以取中频信号的幅值作为偏振控制的反馈信号来控制信号光的偏振态。

3 SPO 算法

常用的偏振控制算法——模拟退火算法, 需要通过大量的迭代才能达到最优, 并且 PCD-M02 每个通道的控制电压达到控制范围的极限值时需要重置该通道电压, 称之为第一种复位。粒子群算法和遗传算法的种群是随机产生的, 这增加了第一种复位发生的可能性, 并且遗传算法施加第一个个体之后偏振态会发生改变, 这时将记录的中频信号幅值作为适应值, 施加第二个个体时需要将已改变的偏振态复位到初始的偏振态, 称之为第二种复位, 第二种复位的存在使粒子群算法和遗传算法在控制的过程

程中耗费近一倍的时间。粒子群算法的速度更新公式可以提供较快的收敛速度,遗传算法中变异的概念具有跳出局部最优的能力和增强全局搜索的能力。本研究将粒子群速度更新公式和变异的概念结合起来设计 SPO 算法,使用 SPO 算法实现相干光通信系统中的偏振控制。

3.1 SPO 算法的设计

1) 初始电压、初始步长的设计

PCD-M02 每个通道的工作电压范围为 0~140 V,所引起的相位延迟为 0~5 π ,算法初始化时设计的三个通道的电压 U_1 、 U_2 、 U_3 为每个通道所施加电压极限值 U_{\max} 的一半,即

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_{\max}/2. \quad (12)$$

这样即使寻找的目标偏振态与初始的偏振态相差 π ,这种设计也会使每个通道都可以产生至少 2π 的相位延迟,减少算法初步寻优过程中第一种复位发生的可能性。初始步长的计算公式为

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = r_1 \times \Delta_{\max} = r_1 \times 0.1 \times U_{\max}, \quad (13)$$

式中 r_1 为 $[-1,1]$ 间的随机数,随机的初始步长可增强初始搜索的随机性。

2) 步长更新公式的设计

步长更新公式结合了粒子群算法的速度更新公式和遗传算法里变异的概念,可表示为

$$\Delta_j^{i+1} = \begin{cases} \omega \cdot \Delta_j^i + c \cdot r_2 \cdot (U_{\text{Gbest},j} - U_j^i) + r_1 \cdot \Delta_{\max} \cdot p_2 \cdot [(N-i)/N]^3, & r_2 \leq p \\ r_1 \cdot \Delta_{\max}, & r_2 > p \end{cases}, \quad (14)$$

式中: ω 和 c 分别为惯性权重和学习因子; r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $U_{\text{Gbest},j}$ 为 α_{allbest} 所对应的第 j 通道的电压, α_{allbest} 为算法迭代过程中得到的最佳适应值; $i=1,2,\dots,N$,为迭代次数; $j=1,2,3$,表示偏振控制器的第 j 通道; Δ_j^i 为第 i 次迭代过程中第 j 通道的步长; U_j^i 为第 i 次迭代第 j 通道所施加的电压值; p_2 为抖动因子,是为了抑制算法过早收敛造成算法停止不前的现象以及提高算法的控制精度而引入的; p 为步长的变异概率,表达式为

$$U_j^{i+1} = U_j^i + \Delta_j^{i+1}. \quad (16)$$

$$p = \exp(-p_1 \cdot [(N-i)/N] \cdot (|\Delta_j^i|/\alpha_{\text{allbest}})), \quad (15)$$

式中, p_1 为变异因子,是为了增强算法全局搜索能力和跳出局部最优能力而引入的。

3.2 使用 SPO 算法偏振控制的具体步骤

本研究设计的偏振控制方案中的反馈信号为中频信号的幅值,受信号光光强的抖动和偏振变化的影响,在偏振控制的程序设计中假设中频信号的幅值变化完全是由偏振引起的,则使用 SPO 算法进行偏振控制的具体步骤如下。

1) 算法开始,初始化算法参数,设置最大迭代次数 N 、变异因子 p_1 、抖动因子 p_2 、学习因子 c 、惯性权重 ω 、初始电压 U_j 和初始步长 Δ_j 。

2) 施加三个通道的初始电压值,以中频信号的幅值作为适应值,得到初始的适应值,以初始的适应值作为全局最优适应值,并更新 U_{Gbest} 和 α_{allbest} 。

3) 根据(16)式更新第 j 通道的电压,得到更新之后的适应值,判断适应值是否优于 α_{allbest} ,若更优则更新 U_{Gbest} 和 α_{allbest} 。

4) 通过(14)式和(15)式产生下一次迭代中第 j 通道的步长。

5) 判断三个通道是否依次更新完毕:条件为真,执行下一步;条件为假,跳回步骤 3)。

6) 判断是否达到最大的迭代次数:条件为真,则得到三个通道所施加的最佳电压值,执行下一步,否则跳回步骤 4) 进入下一次的迭代。

7) 得到中频信号幅值的最大值 α_{allbest} 和对应的 U_j ,此时输入 PCD-M02 每个通道的最优电压值 U_j ,程序进入小范围的扰动跟踪。

在控制的过程中假定幅值的变化完全是由偏振引起的,因此初步寻优找到的 U_j 未必是最佳的 U_j 。当程序初步寻优完成并进入扰动跟踪之后,跟踪程序频率约为 1.6 kHz,远大于光强抖动频率 100 Hz,并且偏振态变化缓慢,通过不断扰动调节 U_j 可以将信号光的偏振态控制到最佳位置,若跟踪过程发生第一种复位则选择快速复位重置该通道电压。

SPO 算法不属于群优化算法,算法开始时无论输入光束的偏振态如何,SPO 算法都会通过(12)式改变光束的偏振态,然后通过不断地迭代更新三个通道的电压值使改变之后的偏振态逐渐逼近目标偏振态,因此 SPO 算法不存在像粒子群算法和遗传算法中存在的第二种复位的问题。

4 SPO 算法的仿真与实验研究

相干光通信系统中使用中频信号的幅值作为反馈的偏振控制系统的实验方案如图 4 所示。发射端

经 BPSK(binary phase shift keying)调制之后的信号光通过发射天线发射之后再通过大气传输,在接收端由接收天线接收到的信号光在通过波前校正之后再通过偏振控制器 PCD-M02 输入混频器,与本振激光器发出的本振光相干混频,由混频器输出的 4 路相差 90° 的光信号通过平衡探测器输出 I、Q 两路电信号。

通过数据处理模块提取 Q 路信号的幅值信息,并将其作为偏振控制的反馈信号,通过 PCD-M02 控制信号光的偏振态,中频信号幅值始终处于最大,此时信号光为沿 x 轴的线偏振光,混频效率最大。为了便于观察信号光偏振态的变化,在仿真和实验中用邦加球和斯托克斯矢量来描述信号光的偏振态。

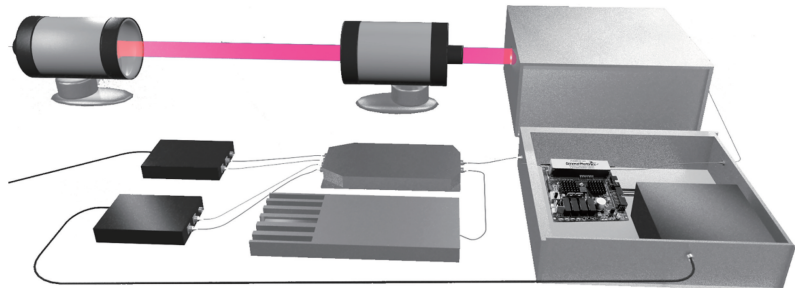


图 4 相干光通信系统偏振控制实验装置

Fig. 4 Experimental device for polarization control of coherent optical communication system

4.1 SPO 算法仿真分析

首先测试本研究引入的变异因子 p_1 和抖动因子 p_2 对 SPO 算法性能的影响,取 $N=80$,仿真中信号光和本振光光强一定,设信号光的初始偏振态为 $(-1, 0, 0)$ 。不同的变异因子 p_1 对 SPO 算法性能的影响如图 5 所示,此时设置 $p_2=0.6$,横坐标为迭代次数,纵坐标为归一化后中频信号的幅值。由图 5 可知: p_1 的值较小时,在整个迭代过程中中频信号幅值的波动较小,算法趋于缓慢的收敛状态,变异次数较少,全局搜索能力较弱,但收敛速度较快; p_1 的值较大时,中频信号幅值波动较大,变异次数较多,全局搜索能力较强,但算法的收敛速度比较缓慢。因此,为了使 SPO 算法在具有较快收敛速度的同时又具有一定跳出局部最优的能力,在接下来的仿真中取 $p_1=0.06$ 。

时,算法通过约 20 次的迭代收敛,在前 20 次的迭代过程中中频信号幅值的波动较小, $p_2=1$ 时,算法需要 50 次迭代才逐渐收敛,在前 50 次的迭代过程中中频信号幅值的波动较大。因此, p_2 的值太大会影响算法整体的收敛速度, p_2 太小又不能有效抑制算法过早收敛,从而造成算法停滞不前的现象,因此折中选取 $p_2=0.6$ 。

不同的抖动因子 p_2 对 SPO 算法性能的影响如图 6 所示,设置 $p_1=0.06$ 。如图 6 所示,当 $p_2=0.2$

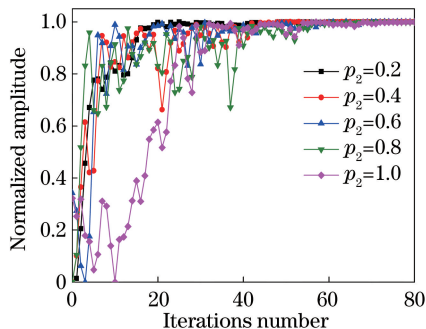


图 6 p_2 对算法性能的影响曲线

Fig. 6 Influence curves of p_2 on the performance of the algorithm

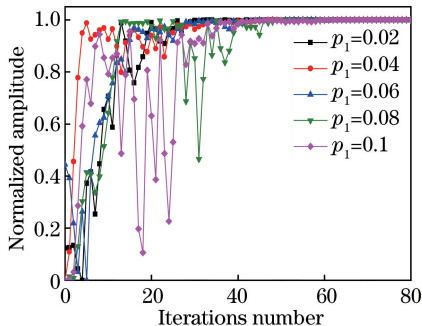


图 5 p_1 对算法性能的影响曲线

Fig. 5 Influence curves of p_1 on the performance of the algorithm

建立偏振控制系统模型,在仿真中取变异因子 $p_1=0.06$,抖动因子 $p_2=0.6$,如图 7 所示。由图 7 可知,SPO 算法大约通过 40 次的迭代后,中频信号的幅值达到最大,在控制的过程中,信号光的偏振态在邦加球上以 10 rad/s 的速度随机波动,但中频信号的幅值依然能够稳定,波动小于 1%。

图 8 为 SPO 算法迭代过程中信号光偏振态在邦加球上的变化情况,其中球上的点表示算法迭代过程中信号光遍历过的偏振态,图 9 为对应斯托克斯参量的变化情况,信号光的初始偏振态 S_s 是随

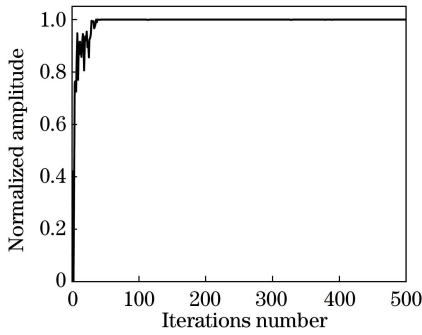


图 7 中频信号幅值变化曲线

Fig. 7 Variation curves of intermediate frequency signal amplitude

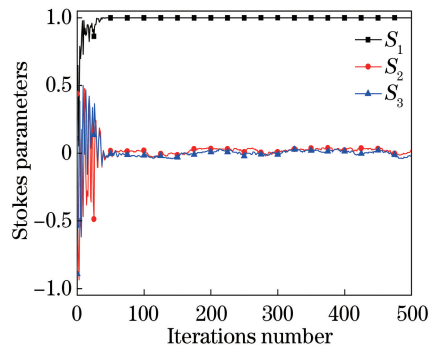


图 9 信号光斯托克斯参量的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of signal light Stokes parameters

机产生的, $S_s = (0.03, 0.53, -0.85)$ 。由图 8 和图 9 可知, 控制之后的信号光的偏振态一直在 $S'_s = (1, 0, 0)$ 附近波动, 此时信号光为沿 x 轴的线偏振光, 中频信号幅值最大, $\alpha = 0$, 混频效率最大 ($\eta = 1$)。仿真结果表明 SPO 算法能够快速寻找到目标偏振态, 并实现信号光偏振态的稳定控制。

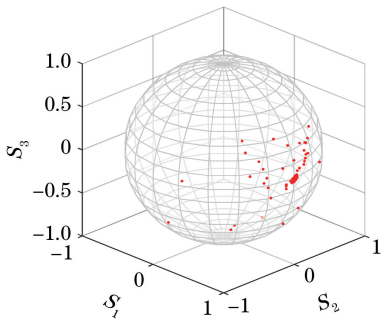


图 8 信号光偏振态的变化

Fig. 8 Changes of polarization states of signal light

4.2 外场实验

图 10 为相干光通信外场实验, 通信距离约为 1.3 km, 通信系统中本振激光器和信号激光器发出的光均为 1550 nm 的偏振光。为了了解接收端信号光偏振态具体的变化情况, 对不同天气情况下的信号光偏振态在 1 h 内的变化情况进行了测试, 如图 11 所示。图 11(a) 中信号光偏振态的平均变化速率为 0.04 rad/s, 变化的最大速度为 0.3 rad/s, 图 11(b) 中信号光偏振态的平均变化速率为 0.31 rad/s, 最大变化速率为 0.98 rad/s, 图 11(c) 中信号光偏振态的平均变化速率为 0.087 rad/s, 最大变化速率为 0.82 rad/s。图 11 中每次测得的信号光偏振态都有所不同, 其主要原因是本系统使用的光纤为单模光纤, 光纤的弯曲抖动都会改变信号光的偏振态, 但信号光偏振态的变化范围较小, 并且变化速度缓慢。通过 SPO 算法初步寻优找到偏振态的最佳位置, 然后通过小范围扰动跟踪即可。

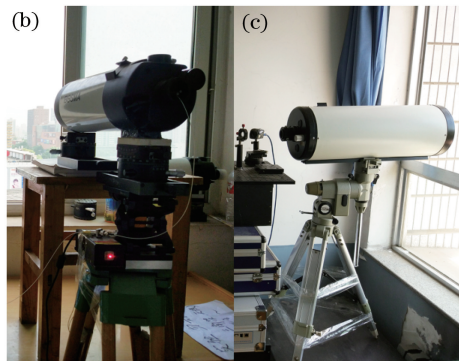


图 10 相干光通信外场实验。(a)实验链路;(b)发射端;(c)接收端

Fig. 10 External filed experiment of coherent optical communication.

(a) Experimental link; (b) transmitting terminal; (c) receiving terminal

图 12 为短时间内两组偏振控制系统在开环和闭环状态下中频信号幅值的变化情况。如图 12 所示, 偏振控制系统在前 10 s 处于开环状态, 在第 10 s

开启偏振控制器。图 12(a) 中偏振控制系统在开环状态下的中频信号的幅值在 0.18~0.89 V 之间波动, 闭环之后, 中频信号幅值快速增大, 并在 1.0~

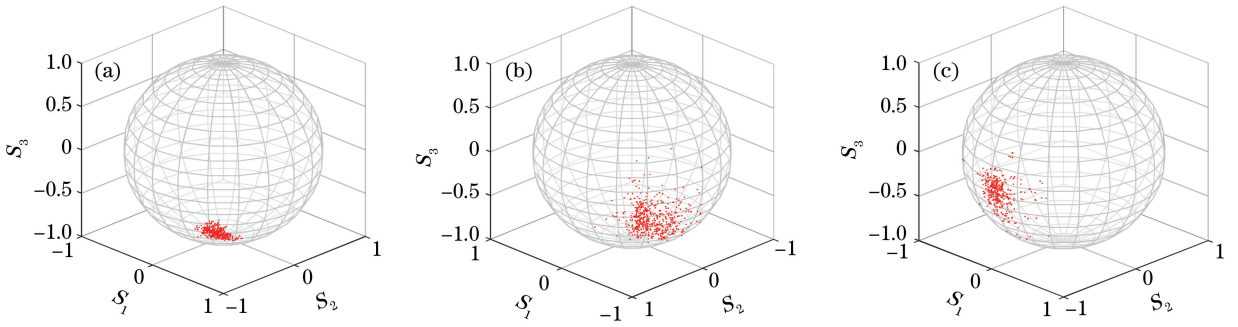


图 11 信号光偏振态的变化。(a) 2018-04-23, 21:30-22:30, 晴, 16 °C ;

(b) 2018-04-25, 17:00-18:00, 多云, 17 °C ;(c) 2018-05-06, 22:00-23:00, 小雨, 14 °C

Fig. 11 Changes of polarization states of signal light. (a) 2018-04-23, 21:30-22:30, sunny, 16 °C ;

(b) 2018-04-25, 17:00-18:00, cloudy, 17 °C ; (c) 2018-05-06, 22:00-23:00, rain, 14 °C

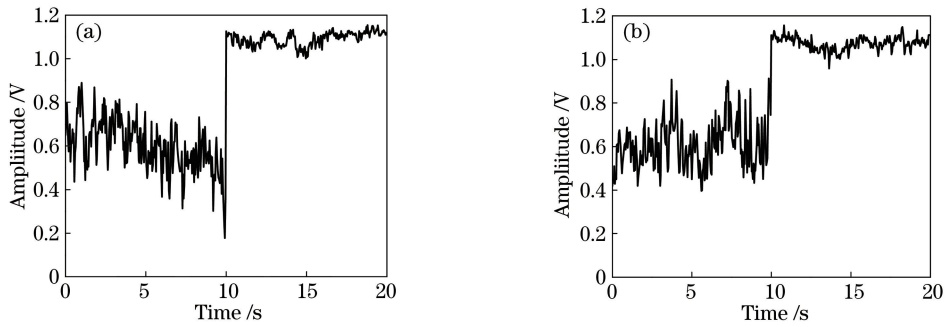


图 12 偏振控制系统中频信号幅值的变化。(a) 2018-04-23;(b) 2018-04-24

Fig. 12 Amplitude variation of intermediate frequency signal in polarization control system.

(a) 2018-04-23; (b) 2018-04-24

1.15 V之间波动,波动方差由 0.014 减小为 0.001,混频效率大约提升了 64%;图 12(b)中偏振控制系统开环时中频信号的幅值在 0.4~0.91 V 之间波动,闭环之后在 0.96~1.15 V 之间波动,波动方差由 0.012 减小为 0.001,混频效率大约提升了 64%。由图 12 可知,当偏振控制系统闭环之后,偏振控制系统基本消除了由偏振所引起的幅值抖动,信号质量提升,闭环之后中频信号幅值的抖动可以看作是由大气湍流造成的光强波动所引起的。

5 结 论

相干光通信系统中,在接收端为了让微弱的信号光完全进入光混频器相干混频,使混频效率提高,必须对接收到的信号光进行偏振控制。首先从理论上推导分析了相干光通信系统中信号光的偏振态对中频信号和混频效率的影响;为了提高相干光通信系统的混频效率,设计采用中频信号的幅值作为反馈控制信号光偏振态的方案;针对常用偏振控制算法存在的不足设计了一种适用于相干光通信的偏振控制算法 SPO,仿真表明 SPO 算法能快速实现偏

振控制;通过外场实验观察信号光偏振态的具体变化情况,发现信号光偏振态变化缓慢,但偏振态具有不确定性;最后通过实验验证,偏振控制系统在闭环状态下中频信号的幅值快速提升,混频效率提升了 64%左右,中频信号波动的方差减小为 0.001,完成了相干光通信系统中的偏振控制,提高了混频效率。本研究所选用的快速复位方式在复位发生时会使信号产生较大的波动,复位算法的设计是偏振控制的难点。下一步工作会着力研究较好的复位算法以及选择其他的偏振控制器件,以得到更好的偏振控制效果,提高通信系统性能。

参 考 文 献

- [1] Pfau T, Hoffmann S, Adamczyk O, *et al.* Coherent optical communication: Towards realtime systems at 40 Gbit/s and beyond[J]. *Optics Express*, 2008, 16 (2): 866-872.
- [2] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43

- (7): 0706004.
 韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.
- [3] Du X Y, Zhao D M. Changes in generalized Stokes parameters of stochastic electromagnetic beams on propagation through ABCD optical systems and in the turbulent atmosphere [J]. Optics Communications, 2008, 281(24): 5968-5972.
- [4] Ghafary B, Alavinejad M. Changes in the state of polarization of partially coherent flat-topped beam in turbulent atmosphere for different source conditions [J]. Applied Physics B, 2011, 102(4): 945-952.
- [5] Wang M J, Jia W G, Zhang S Y, *et al.* Effect of Raman gain on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034212.
 王美洁, 贾维国, 张思远, 等. 低双折射光纤中拉曼增益对光偏振态的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034212.
- [6] Segura M, Vukovic N, White N, *et al.* Low birefringence measurement and temperature dependence in meter-long optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2697-2702.
- [7] Waddy D S, Lu P, Chen L, *et al.* Fast state of polarization changes in aerial fiber under different climatic conditions [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 1035-1037.
- [8] Noe R, Heidrich H, Hoffmann D. Endless polarization control systems for coherent optics [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(7): 1199-1208.
- [9] Ma T T, Tong S F, Nan H, *et al.* Effect of polarization property of signal light on mixing efficiency of space coherent detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020604.
 马婷婷, 佟首峰, 南航, 等. 信号光偏振特性对空间相干探测混频效率的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020604.
- [10] Walker N G, Walker G R. Polarization control for coherent communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(3): 438-458.
- [11] Li W W, Zhang X M, Chen K S, *et al.* A study for phase-shift characteristics of polarization controller based on simulated annealing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 449-453.
 李伟文, 章献民, 陈抗生, 等. 基于模拟退火算法的偏振控制器波片相移特性研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(4): 449-453.
- [12] Zhang X G, Zheng Y, Shen Y, *et al.* Particle swarm optimization used as a control algorithm for adaptive PMD compensation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 85-87.
- [13] Mamdoohi G, Esmailian A, Abas A F, *et al.* Realization of microcontroller-based polarization control system with genetic algorithm [C] // 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), December, 15-17, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2009: 774-779.
- [14] Huang Z M, Liu C L, Li J F, *et al.* Fiber polarization control based on a fast locating algorithm [J]. Applied Optics, 2013, 52(27): 6663-6668.
- [15] Pikaar T, van Bochove K, van Rooyen A, *et al.* Nondeterministic endless control system for active polarization control [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(12): 1982-1987.
- [16] Zhang X G, Duan G Y, Xi L X. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarizations [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1173-1176.
 张晓光, 段高燕, 席丽霞. 偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1173-1176.
- [17] Smith A M. Single-mode fibre pressure sensitivity [J]. Electronics Letters, 1980, 16(20): 773.
- [18] Zhang Q Y, Zhu Y, Su Y, *et al.* Research on the polar 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.