

一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统

黄媛, 赵家钰, 王金东*, 杜聪, 彭清轩, 源毅萍, 陈映宇, 於亚飞, 魏正军, 张智明

华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 在光纤中传输的光信号,其偏振态(SOP)会受到外界环境的影响而发生随机变化,因此在偏振复用光纤通信系统、偏振编码光纤量子密钥分发(QKD)等系统中,需要插入光纤信道偏振补偿模块对光纤中随机双折射效应引起的偏振态变化进行实时补偿,以保证相应通信系统能够正常工作。根据波分复用光纤信道偏振补偿的理论模型,实现了偏振态相互共轭的两路参考光的制备,采用集成化的偏振探测器对实时变化的偏振态进行检测。在此基础上,提出了一种可以实时补偿光纤信道偏振变化的实验系统,该系统可以应用于偏振复用的光纤通信系统中,也可应用于光纤 QKD 系统中。实验数据表明,所设计的实验系统可以保障 QKD 在 5 km 传输距离下连续稳定运行 8 h 以上,量子比特误码率为 1.96%。

关键词 光通信; 量子密钥分发; 随机双折射; 偏振补偿; 共轭

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1406003

A Real-Time Polarization Compensation System Based on Wavelength-Division Multiplexing for Optical Fiber Communication Systems

Huang Yuan, Zhao Jiayu, Wang Jindong*, Du Cong, Peng Qingxuan, Yuan Yiping, Chen Yingyu, Yu Yafei, Wei Zhengjun, Zhang Zhiming

Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract The polarization states of the optical signals transmitted through optical fibers change randomly because of the influence of the external environment. Therefore, a real-time polarization compensation module must be inserted into the optical fiber communication systems, such as the polarization multiplexing communication system and the polarization encoding fiber quantum key distribution(QKD) system, to compensate the polarization changes that can be attributed to the random birefringence effect in optical fibers. Thus, the stable operation of the corresponding communication system can be ensured. In this study, an experimental system that can compensate for the variation of the polarization states in real time is proposed according to the polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing in optical fibers. In this system, two reference lights with conjugated polarization states are prepared and an integrated polarization detector is used for detecting the changing polarization states in real time. This system can be applied to the optical fiber communication systems. The experimental results show that when this system is applied to a QKD system, continuous and stable operation can be achieved at a transmission distance of 5 km for more than 8 h with a quantum bit error rate of 1.96%.

Key words optical communications; quantum key distribution; random birefringence; polarization compensation; conjugate

OCIS codes 060.2330; 270.5565; 260.1440; 260.5430

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-04-11; 录用日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61771205)、广东省自然科学基金(2015A030313388)、广东省科技计划(2015B010128012, 2017KZ010101)

* E-mail: wangjindong@m.scnu.edu.cn

1 引 言

光纤通信是一种以光波作为信息载体,以光纤作为传输媒介的通信方式,以其损耗低、光频率高、大容量、高效率的优势从光通信中脱颖而出,并在诸多领域中被广泛应用^[1],其中最具有代表性的应用有旨在进行保密传输的量子密钥分发(QKD)^[2-4]。光纤通信的编码方式是影响通信质量的一个前提因素,主要的编码光参量有强度、相位(含频率)和偏振。前两个参量用于高速通信时,系统会因为强烈的非线性出现信噪比低下、误码率大、谱效率低下的问题^[5]。而光的偏振具有天然的功率均衡性,用于编码通信时可以降低非线性效应,提高系统的谱效率^[6-7],扩大光纤通信的信息容量^[8],因此偏振编码在光纤高速通信领域更具优势。然而在光纤中传输的偏振态(SOP)易受各种光纤效应的影响,使编码的偏振信息发生变化,增加通信误码^[9-10]。针对光纤中偏振变化的问题,已有多种光纤信道偏振补偿方案被提出,主要有双向光路偏振补偿^[11]、中断式偏振补偿^[12]、时分复用偏振补偿^[13]、波分复用偏振补偿^[14]和偏振基追踪补偿^[15],各方案各有优劣,其中 WDM 偏振补偿能避免时域上信号光和参考光的交错、补偿和通信过程中断的问题,为理论研究与实际应用提供了较多的便利。

波分复用(WDM)偏振补偿利用 WDM 将波长不同的参考光和信号光复用到相同的信道中,并施加相同的偏振控制,解复用后通过实时探测参考光 SOP 的变化,并以此作为反馈信号来实时更新对信道的偏振控制,从而补偿信道中信号光 SOP。2008 年, Xavier 等^[14]完成了基于 WDM 偏振补偿的 QKD 实验,实验采用手动偏振控制器(PC)分别制备出 0° 和 $+45^\circ$ 线偏振态的参考光,用偏振片(P)和经典光电探测器(PD)探测光强以反馈参考光的 SOP,但由 PC 制备的 SOP 不够稳定,导致探测到的光强变化不仅受信道的影响,还受制备的参考光 SOP 误差的影响,增加了偏振补偿的误差,此外系统还存在参考光产生的瑞利散射和拉曼散射影响信号光的单光子计数的问题。2009 年, Xavier 等^[16]通过调制参考光的光强,减小了系统散射噪声,但未对参考光的制备与探测进行改进。2018 年, Li 等^[17-18]增大了参考光与信号光的波长间距,并改用同一波长的弱光脉冲作为两路参考光,以此减小散射光的影响。参考光脉冲经偏振分束器(PBS)分为两路,其中一路经延迟后沿光纤轴向旋转 45° 的方

向进入耦合器,以制备共轭偏振态。此结构使两路参考光先时分复用,再与信号光波分复用到相同信道。参考光探测结构由分束器(BS)、PBS 和光电二极管组成,分别探测 0° 、 90° 、 45° 和 135° 线偏振态的光强响应计算控制信号。此方案减小了散射光,提高了参考光制备的稳定性,并细化了探测反馈结构。

在波长不同的两路参考光的 WDM 偏振补偿系统中,本文就参考光 SOP 的制备与探测部分提出了新方案:参考光的制备是利用 PBS 和法拉第旋转器(FR)产生两路具有稳定共轭关系的参考光(0° 和 45° 线偏振态),为探测反馈提供更稳定的目标态;参考光的探测是使用集成化偏振光探测器(POD),实时快速测量参考光 SOP 信息,获取其归一化的斯托克斯参量(s_1, s_2, s_3),然后计算其与目标 SOP 参量的差值,进而补偿信道的偏振漂移。本文的目的是在基于不同波长参考光的 WDM 偏振补偿系统里制备出偏振态更稳定的参考光,便于准确地获取参考光的偏振信息,降低参考光偏振态的不稳定性对信道偏振补偿产生的误差,提高补偿性能。

2 基本理论

2.1 单模光纤中偏振态的变化

在单模光纤中,光信号以两个垂直的线偏振模的形态存在。在理想的光纤中,这两个相互垂直的偏振模有相同的传输常数^[10](即两个正交偏振模的折射率、传播速度完全相同),它们彼此简并,耦合的偏振态在传输过程中不受影响,偏振态不会发生变化,如图 1(a)所示。但在现实中的光纤或光器件中,各种因素对两种偏振模式的作用不一样,会产生各种各样的偏振效应,例如偏振相关损耗(PDL)、偏振相关相移或双折射、偏振相关增益(PDG)、偏振模色散(PMD)等,导致耦合的偏振态随机变化。如,偏振模色散就是由于正交偏振模的传播速度不同,两个偏振模之间产生时延,之后经耦合叠加产生新的偏振态,导致光纤中偏振态发生变化,如图 1(b)所示。

造成单模光纤中偏振态不稳定的因素有很多,包括光纤本身的内部因素和光纤受到的外部因素,这些因素都是通过改变偏振光在光纤中的两个正交分量来引起光纤的双折射效应。内部因素主要分为两方面:1)波导双折射,光纤截面几何畸变引起波导形状双折射;2)内部应力双折射,光纤各层掺杂的材料不同,热膨胀系数不同,使截面应力不对称,引起内部应力双折射。外部因素是引起光纤双折射特性

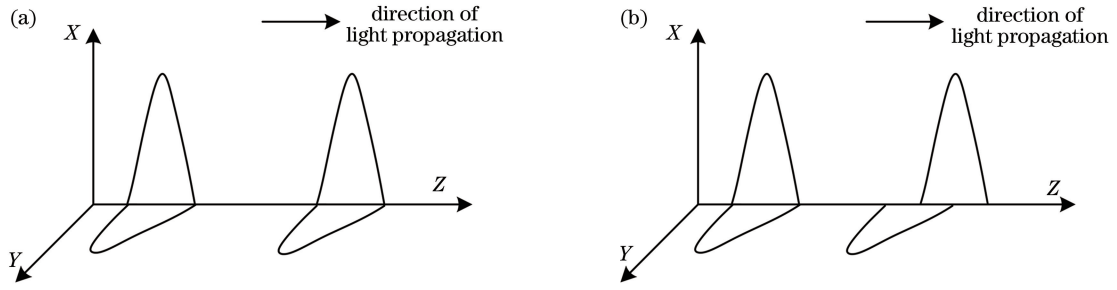


图 1 偏振态传输。(a)在理想光纤中传播的正交偏振基模;(b)在 PMD 的情况下传播的正交偏振模

Fig. 1 Transmission of polarization states. (a) Orthogonal polarization fundamental mode propagating in ideal fiber; (b) orthogonal polarization mode propagating in the case of PMD

变化的原因,可使光纤产生新的特异性,如外部机械力造成的光弹性效应、外磁场造成的法拉第效应、外电场造成的克尔效应等^[10]。

2.2 WDM 式偏振补偿基本理论模型

WDM 的偏振补偿方案实质上是补偿光纤信道对信号光 SOP 的影响,加载偏振信息后的信号光在光纤信道中传输,受到光纤双折射的影响后,其编码的偏振信息会发生变化从而产生误码。用 WDM 在光纤信道中加入参考光,使其产生相同的偏振变化,探测参考光的偏振变化以控制电控偏振控制器 (EPC) 进行逆变化,进而补偿信道对信号光的影响。Xavier 等^[14]指出理论上,如果将两个相互共轭的 SOP 作为参考态发送到光纤,即可实现对任何偏振态的完全控制。然而用 WDM 引入的两路参考光和信号光的波长各不相同,导致光纤信道产生的偏振变化是波长相关的,为了证明 WDM 偏振系统的可行性,需要对 WDM 偏振补偿系统进行理论证明,找到成立的条件。

根据用 WDM 引入参考光的偏振补偿思想,理论推导证明偏振控制器对参考光偏振的矩阵变化也能补偿信号光,即用偏振控制器控制参考光的偏振态不变时,信号光的偏振态也可得到补偿。由此建立 WDM 式偏振补偿基本模型如图 2 所示,选择 0° 和 $+45^\circ$ 线偏振态(分别用 S_1 、 S_3 表示)作为两路参考光,其角频率分别为 ω_1 和 ω_3 ,并与角频率为 ω_0 的信号光(其偏振态用 S_2 表示)通过 WDM 进入相同光纤信道。WDM 的角频率间距为 $\Delta\omega$,因此参考光对应的角频率分别为 $\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega$ 和 $\omega_3 = \omega_0 + \Delta\omega$ 。光纤信道对偏振态的变化表示为琼斯矩阵 M ,经过光纤的偏振变化后参考光 SOP 变为 S'_1 和 S'_3 。在光纤的末端加入一个 EPC,设 EPC 执行一系列的偏振旋转,使从信道输出的 S'_1 和 S'_3 变回到传输前的状态即 S_1 、 S_3 ,其中偏振旋转的矩阵可表示为 R_1 和 R_3 。

这个变化具有波长相关性,因此不同波长(角频率)的光在相同信道中的偏振变化都存在差异,例如参考光 S_1 在信道中的偏振变化表示为矩阵 $M(\omega_1)$ 。

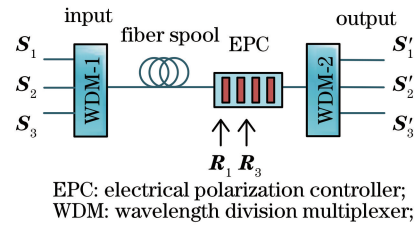


图 2 WDM 式偏振补偿基本模型

Fig. 2 Basic model of WDM-type polarization compensation

将上述分析转换成数学公式表达,WDM 偏振补偿的证明过程如下:

已知:

$$R_1 M(\omega_1) S_1 = S_1, \quad (1)$$

$$R_3 M(\omega_3) S_3 = S_3, \quad (2)$$

$$R_3 S_1 = S_1, \quad (3)$$

$$R_1 S_3 = S_3, \quad (4)$$

求证

$$R_3 R_1 M(\omega_0) S_2 = S_2. \quad (5)$$

可见 EPC 的变换 R_1 和 R_3 分别抵消了由光纤双折射对参考光输入 SOP 中 S_1 和 S_3 造成的影响,使得参考光的偏振态得以补偿。但 R_3 对 S_1 没有影响, R_1 对 S_3 没有影响,这是因为用庞加莱球表示共轭 SOP 中 S_1 和 S_3 的时候, S_1 和 S_3 分别显示在球的两轴上,而 EPC 对 SOP 的控制相当于绕 X 或 Y 轴旋转;而 R_3 能够补偿 S_3 的偏振态,这是因为 EPC 对 S_3 的控制操作相当于在庞加莱球体中围绕 S_1 所在的轴作旋转,这样的旋转对 S_1 是没有影响的^[19]。在此条件下 EPC 控制补偿了两个参考光的偏振态,需要求证的是信号光偏振态 S_2 在 R_1 和 R_3 的作用下,输出端也能保持偏振不变,即求证(5)式。通过(1)、(3)式可得

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(j\theta) \end{pmatrix} \mathbf{M}^{-1}(\omega_1),$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中:相位 θ 和 φ 是由 EPC 进行控制时引入的相位; $\mathbf{M}^{-1}(\omega_1)$ 表示变换矩阵 $\mathbf{M}(\omega_1)$ 的逆矩阵。

在考虑波长差的情况下,因为 $\omega_0 = \omega_1 + \Delta\omega$ 则角频率 ω_0 的变换矩阵表示为

$$\mathbf{M}(\omega_0) = \mathbf{M}(\omega_1) + \Delta\omega(\partial\mathbf{M}/\partial\omega), \quad (7)$$

式中: $\frac{\partial\mathbf{M}}{\partial\omega}$ 表示光纤传输矩阵对于角频率的变化率。

将(6)式和(7)式代入(5)式中可得

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[j(\theta + \varphi)] \end{pmatrix} (\mathbf{I} + \Delta\omega\mathbf{M}^{-1} \frac{\partial\mathbf{M}}{\partial\omega}) \mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_2, \quad (8)$$

式中: \mathbf{M}^{-1} 和 $\frac{\partial\mathbf{M}}{\partial\omega}$ 都是对于 ω_1 的变量; \mathbf{I} 是计算产生的单位矩阵。显然对任意 \mathbf{S}_2 , (8)式都成立的条件是当 $\theta + \varphi = 0/2\pi$ 且

$$\Delta\omega \parallel \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial\mathbf{M}}{\partial\omega} \parallel \simeq 0 \quad (9)$$

成立。其中(9)式的矩阵值恰好是差分群延迟的 τ 的一半^[14],即

$$\parallel \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial\mathbf{M}}{\partial\omega} \parallel = \frac{\tau}{2}, \quad (10)$$

则(9)式可以定义为 $\tau\Delta\omega \simeq 0$ 。

由以上理论分析可知,当旋转 $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_3$ 的相位满足 $\theta + \varphi = 0/2\pi$ 且角频率差 $\Delta\omega$ 和光纤信道的 PMD 导致的差分群延迟 τ 满足公式 $\tau\Delta\omega \simeq 0$ 时,有 $\mathbf{R}_3\mathbf{R}_1 = \mathbf{M}^{-1}$, 这表明 EPC 的作用是抵消了 \mathbf{M} 产生的偏振变化,也就是说只要波长间隔和光纤差分群时延都足够小,我们可通过对参考光的偏振态的探测与控制实现对任何偏振态的完全控制。

3 WDM 实时偏振稳定系统

根据 WDM 的偏振补偿的理论模型,设计了一套基于 WDM 的光纤信道偏振补偿系统。系统的两个经典信道使用中心波长分别为 $\lambda_1 = 1549.32 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 1550.92 \text{ nm}$ 的直调分布式反馈激光器(DFB)产生连续稳定的参考光。信号光通道的中心波长为 $\lambda_2 = 1550.12 \text{ nm}$,波长的设置使参考光和信号光之间的波长间距为 0.8 nm ,便于密集波分复用器(DWDM)对三个信道进行多路复用。实验系统的光纤信道长 5 km ,PMD 为 0.0036 ps ,由基

本理论可计算得 $\tau\Delta\omega = 0.0036 \text{ ps} \times 0.1 \text{ nm} \times 2\pi \text{ THz} = 0.00072\pi \simeq 0$,实验的参数符合基本理论的条件。实验装置如图 3 所示,对于参考光部分,两路参考光经过隔离器(ISO)和带通滤波器(BPFI)进入制备共轭偏振态的结构。ISO 能隔离后向散射避免对激光器造成影响,起到保护激光器(LD)的作用,BPFI 可以减小参考光带宽,以减小对信号光的影响。参考光进入共轭偏振态制备的结构后其 SOP 被分别调制为具有稳定共轭关系的 0° 和 45° 线偏振态,再通过 DWDM 进入信道中。经过光纤和 EPC 后,解复用器将参考光与信号光分开以便各自探测。参考光偏振探测部分是含有 POD 的集成化探测模块,能够将探测得到的斯托克斯参量以电信号的形式输出,再经过复用电路(MC)和模数(AD)转换器处理后输入现场可编程门阵列(FPGA)开发板,FPGA 运行算法计算出控制信号后输入至四板压电 EPC,以补偿光纤信道对 SOP 的影响(例如矩阵 \mathbf{M})。信号光可从参考光的同向或反向发出,经过相同信道变化(\mathbf{M})和 EPC 的补偿(\mathbf{M}^{-1})后其偏振变化不会超过精度阈值。对于量子通信来说,反向传播量子信号可以限制侧通道瑞利散射光的干扰。

参考光 SOP 的稳定性是偏振控制系统的基础,只有确保参考光的 SOP 不变,才能进一步得出偏振态在信道中的准确变化。为了加强制备参考光 SOP 的稳定性,使两路参考光分别产生稳定的 0° 和 45° 线偏振态,本研究设计的光路如图 4 所示,其中 PBS-3 是四口偏振分束器(结构见图 5),R 端出入口的保偏光纤是以快轴对准的,T 端是以慢轴对准的,此设计可确保两路参考光的 SOP 在同一参考系下并且具有波长单色性。光功率计(OPM)可实时观测 PBS 分出光的光强,以反映系统内参考光的光强。此处手控偏振控制器(PC)并不会改变制备的偏振态,只是改变制备后参考光的光强,并且可控制参考光进入信道的光强以及 POD 端接收的光强。因此,用此结构代替 PC 制备偏振态,可避免手控 PC 长时间控制产生的偏振漂移的问题。

为了实时探测参考光的偏振态,直接获取参考光 SOP 的斯托克斯参量用以计算控制信号,本系统选用集成化 POD 来探测参考光 SOP。POD 采用分振幅法探测 SOP 来实时获取四个斯托克斯参量对应的电压值,并以模拟电信号的形式输出,MC 对模拟信号执行功放处理,并将四路电信号时分复用,继而由 AD 转换器转换成数字电信号后传入 FPGA,并求得归一化的斯托克斯参量(s_1, s_2, s_3)。

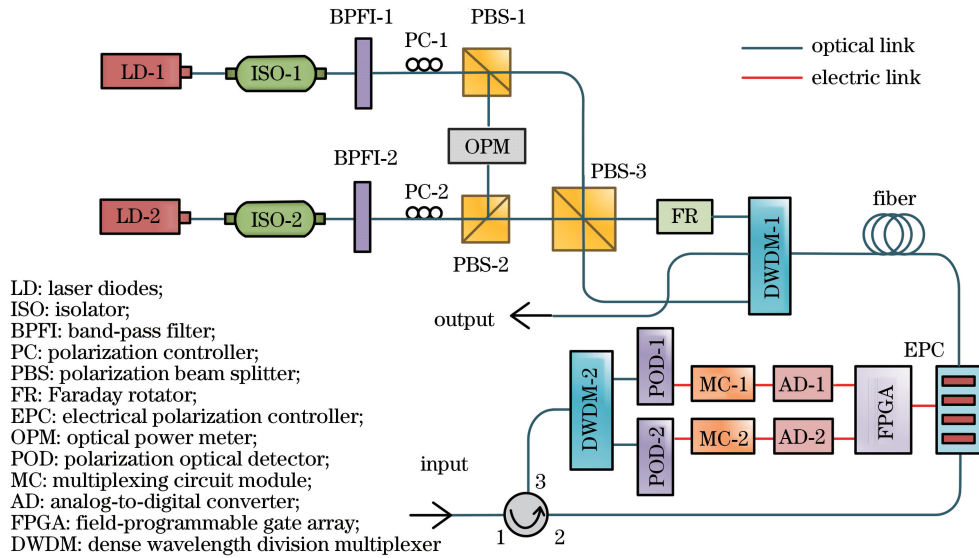


图 3 WDM 式实时偏振态补偿系统的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a real-time polarization state compensation system based on WDM

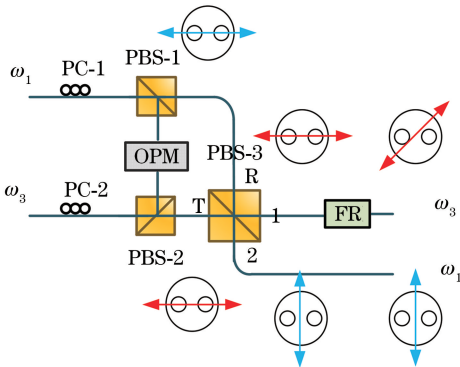


图 4 共轭偏振态的制备结构

Fig. 4 Preparation structure of conjugate polarization state

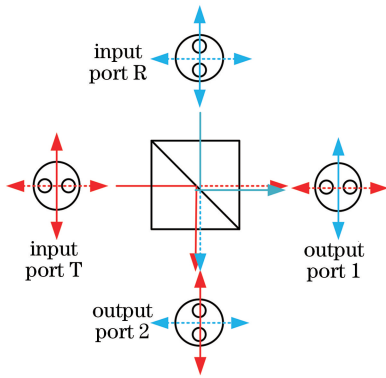


图 5 四口偏振分束器上保偏光纤的标准取向

Fig. 5 Standard orientation of polarization-maintaining fibers on a four-port polarizing beam splitter

基于 FPGA 的程序计算当前斯托克斯参量,并求得其与目标斯托克斯参量的差值,这个差值反映了信道的偏振变化。若将此差值控制在设置的阈值

内,信号光的偏振就可得到补偿,此范围在庞加莱球上显示为以目标点为顶点的球冠,与设置的算法精度有关。若计算差值超出阈值,FPGA 则加载带动量的梯度算法,计算控制信号,通过控制 EPC 来改变偏振态,以控制差值在规定的阈值范围内。若达到阈值,系统将不再更新对 EPC 的控制信号。

考虑到控制 EPC 时要求控制速度快且运算时间短,结合每次计算使用的数据量,FPGA 植入的程序算法选用带动量的梯度下降算法。程序分为如下几个部分(如图 6):1)FPGA 通电运行后,开始读取 AD 数据并计算当前 SOP 的归一化斯托克斯参量,

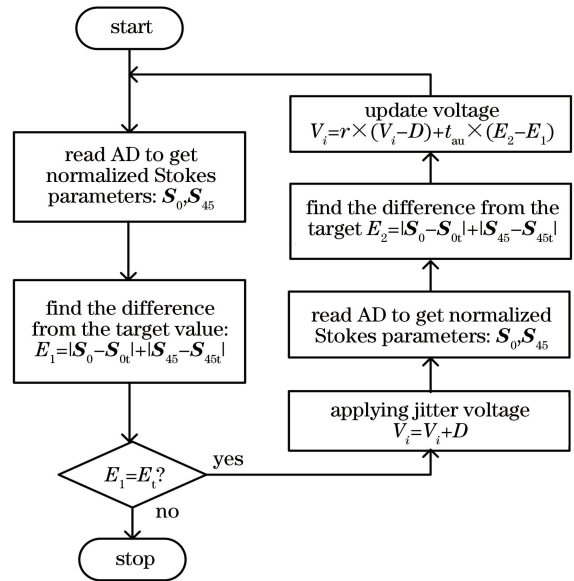


图 6 偏振控制程序流程图

Fig. 6 Flowchart of polarization control program

将原 0° 、 45° 线偏振参考光的斯托克斯参量分别表示为 S_0 、 S_{45} ; 2) 计算当前 SOP 与目标值 S_{0t}/S_{45t} 的差值 E_1 ; 3) 判断当前差值 E_1 是否大于设置的阈值 E_t , 若不大于阈值, 则程序返回步骤 1), 若大于阈值则进入下一步; 4) 给 EPC 控制信号 V_i 加一个抖动信号 D 后, 探测的参考光偏振态会立即变化; 5) 读取 AD 数据并计算当前 S_0 、 S_{45} ; 6) 计算当前 SOP 与目标值 S_{0t}/S_{45t} 的差值 E_2 ; 7) 计算控制电压 $V_i = r \times (V_i - D) + t_{au} \times (E_2 - E_1)$, 继续返回步骤 1) 进行计算, 其中 r 为带动量的梯度下降算法的动量参量, t_{au} 为程序算法的步长。在这样的实时监控下, 系统可保持参考光的偏振态控制不变, 一旦探测计算超出阈值范围, 程序立刻进入补偿, 直到满足阈值条件。

4 系统实验测试

4.1 在经典光纤系统中测试

在经典光纤通信中, 用于通信的信号光通常是强光, 而系统中的各种散射光噪声通常是皮瓦量级的, 根据信号光的大小不同, 噪声会比信号小大约 6~9 个数量级, 散射噪声对信号光的影响可忽略不计, 因此本系统可直接用于经典光纤通信系统进行

偏振补偿。为了验证所提偏振补偿系统(图 3)能够有效补偿参考光偏振信息, 在系统的输入端加上中心波长为 1550.12 nm 的激光器以提供偏振信号, 在其输出端用索雷博公司的确定性偏振控制器(型号为 DPC5500)探测偏振信号。因为考虑到 DPC5500 的在线偏光计模式(IPM)可以实时探测光的 SOP, 并可将其显示为庞加莱球上的一点, 记录庞加莱球上点的轨迹可直观反映偏振态的变化。在实验室的环境里, 分别在仅开启偏振控制和关闭偏振控制的条件下测试测试信号光的偏振态 30 min, 测试结果如图 7 所示。

图 7 实验结果显示, 在没有偏振控制的 30 min 内, 信号光的偏振态在庞加莱球上的轨迹跨过了半个球面, 并且没有固定的变化倾向, 说明光纤中偏振态是随时间随机变化的; 在开启偏振补偿系统的 30 min 内, 信号光的偏振态在庞加莱球上的轨迹趋于一点, 说明光纤中偏振态被稳定地控制在一定范围内。对比图 7(a) 和图 7(b) 的两个实验结果, 显然可得在本文的偏振补偿系统下, 信号光的偏振态得到了稳定的补偿, 由此证明该系统可用于偏振补偿。

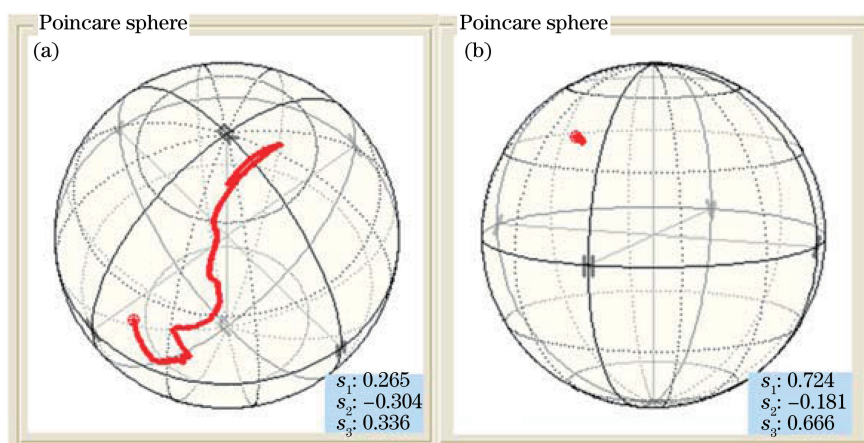


图 7 没有补偿和有补偿时偏振测试 30 min 的结果。(a) 没有补偿时; (b) 有补偿时

Fig. 7 Results of polarization test for 30 minutes without and with compensation.

(a) Without compensation; (b) with compensation

在此基础上, 为了测试系统的补偿效果, 使用 DPC5500 的 IPM 模式下的图表模式来观测接收端信号光归一化的三个斯托克斯参量随时间的变化。在系统输入端调制 0° 偏振信号光, 测试其斯托克斯参量时给光纤一个随机扰动后, 信号光的偏振态就跳出控制阈值, 系统开始补偿并达到稳定, DPC5500 记录这个过程中信号光 SOP 的斯托克斯参量变化情况如图 8 所示。测试结果显示: 0° 的 SOP 在光纤

未受到干扰时其斯托克斯参量(s_1, s_2, s_3)能保持稳定, 外加干扰后, 三个斯托克斯参量的值发生突变, 经过小于 10 s 的时间后恢复到初始值。这说明偏振补偿系统能够立即纠回变化的 SOP, 并且补偿时间小于 10 s。

以上测试说明本偏振控制系统能够有效控制信号光的偏振态, 在系统稳定运行的时候, 可以确保通信中信道偏振态是稳定的。

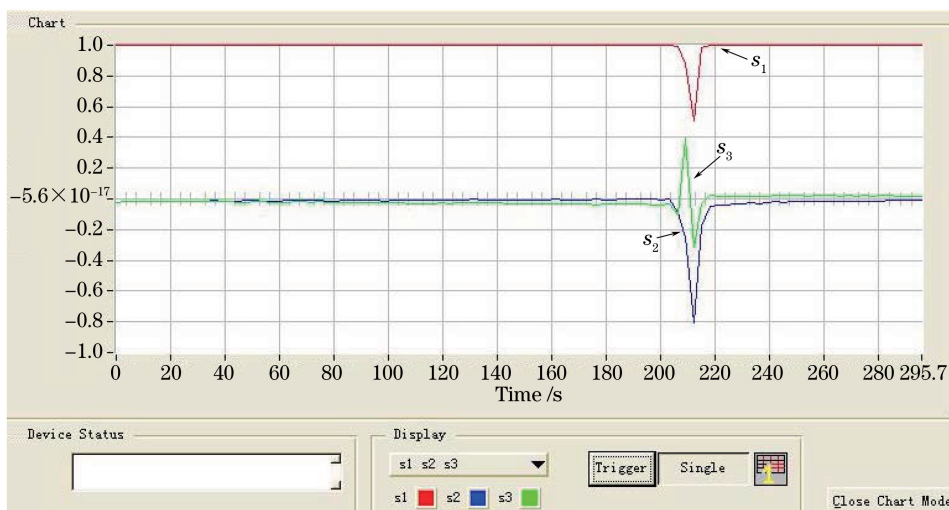


图 8 0°偏振态的斯托克斯参量变化图

Fig. 8 Change graph of Stokes parameter at polarization of 0°

将本系统应用于偏分复用系统中,需要先分析了解偏分复用系统的基本构成及要求,参考基于差分四相位相移键控的偏分复用 (PPDM-DQPSK) 系统,综合分析可得其实验结构如图 9 所示^[20-21]。PDM-DQPSK 系统利用 PBS 制备两路具有水平和垂直线偏振态的信号光,用 DQPSK 调制法对两路光信号(I/Q 两路)分别编码信息,再由 PBS 耦合到相同信道中进行传输,接收端通常用 PBS 执行偏振

解复用。但是传输链路中 PMD 会改变信号的 SOP,导致两路信号与接收端 PBS 的偏振未对准,引起信道间的相干串扰,最终降低两个信道的分离度。因此系统插入 PMD 补偿模块,接收方分出一部分信号作为 PMD 的反馈,实现自适应 PMD 补偿。当信号光的 SOP 稳定时,其加载的信息在接收时可被清楚地分离,由此可提高偏分复用系统的通信质量。

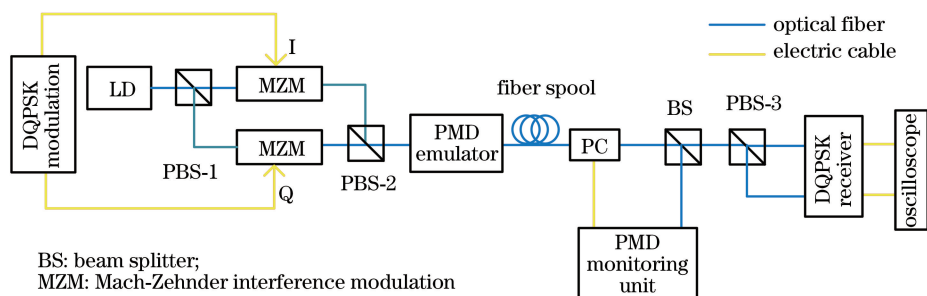


图 9 PDM-DQPSK 系统结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of the PDM-DQPSK system

本系统参考光部分添加 DQPSK 的调制信号后进行通信,与 PDM-DQPSK 系统有异曲同工之妙,且系统自身具备偏振补偿模块,无需在偏分复用时加入 PMD 补偿模块(如图 10 所示)。此处提出非正交态的偏分复用系统:将两路光信号加载信息后分别赋以 0°线偏振态和 45°线偏振态,由 DWDM 复用到相同的光纤信道中通信并在接收方解复用,由 POD 探测部分信号以提供偏振反馈,并由 FPGA 计算控制 EPC 来补偿信道中 SOP 的变化,剩余信号经过转换后即可在示波器上显示信息。本系统的信号光部分经参考光的反馈补偿,可直接加载信息

进行通信,信号光通道不用加入额外的补偿。本偏振控制系统用于偏分复用系统时的显著优点是可以同时对三路信号加载信息并传输,且第三路无需额外的反馈就能补偿信道对信号的影响,且能够进一步提高通信效率。

4.2 在量子密钥分发系统中测试

本偏振补偿系统应用于偏振编码的 QKD 通信中,需要在补偿系统的输入端加上量子密钥编码部分形成 Alice 方,在输出端加上解码探测部分构建通信 Bob 方(如图 11 所示),使量子信号光反向加入参考光的传输信道中。选择量子信号光与参考光

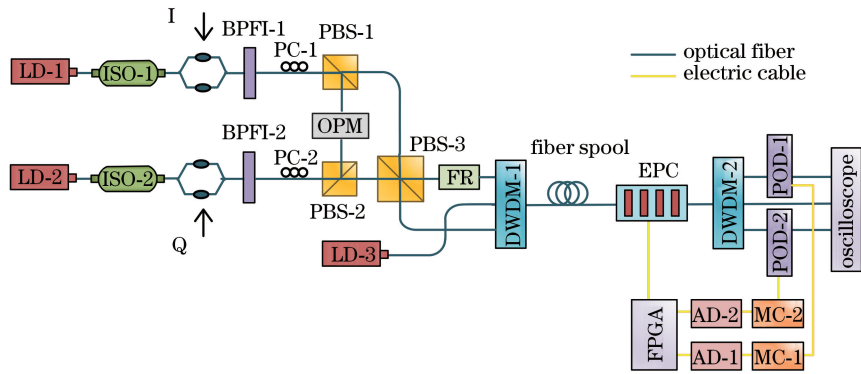


图 10 基于非正交态的偏分复用系统

Fig. 10 Polarization-division multiplexing system based on non-orthogonal polarization

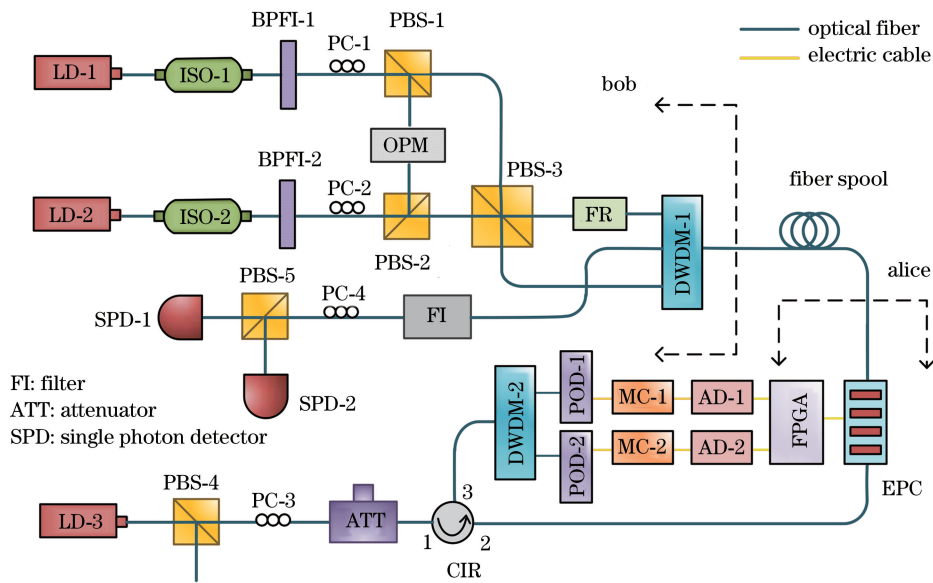


图 11 基于 WDM 的信道偏振补偿 QKD 系统

Fig. 11 Polarization compensation QKD system over optical fibers based on WDM

反向传输,可以减小两侧信道的瑞利散射和拉曼散射对量子计数的干扰。根据偏振编码的 QKD 系统基本结构和 BB84 协议^[5],在 Alice 端有机使用 LD-3、PBS-4 和 PC-3 可以制备出 BB84 协议中的 4 个线偏振态:水平垂直基下 0° 和 90° 线偏振态、对角基下 45° 和 135° 线偏振态,再由可调谐光衰减器 (ATT) 衰减为单光子量级进入信道传输,其平均光子数为 0.8,经过 EPC 和光纤信道到达 Bob 端接收解码,并由单光子探测器 (SPD) 探测响应。由于强参考光束的影响(例如来自光纤通道的瑞利散射光的串扰或由于 DWDM 和滤光片的有限隔离度),量子信道的单光子计数会相应增大,从而对误码率产生影响。因此需要在解码前加置一个滤波器(FI)以减小系统噪声在单光子探测器上的响应。为了评估量子通道和控制通道之间的隔离度,将参考光的发

射功率设置到 +1 dBm,在这种情况下,单光子探测器处信噪比达到 18.12 dB。

为了测试本偏振补偿系统应用于偏振编码 QKD 时的实际运行效果,在 Alice 端分别对制备的 4 个偏振态进行传输测试,通过解码端的单光子计数计算误码率,对每个偏振态实验测试 2 h,连续测试 8 h 后得出在系统稳定补偿的情况下的误码率(如图 12 所示)。从实验误码率图可以看出,在系统稳定补偿的情况下,误码率集中稳定在 2.0%,且不会超过 2.5%。

实验最后测得的量子比特误码率(QBER)为 1.96%,通过进一步分析和实验测试发现误码率的组成包括以下三个部分:1)由于 Bob 解码端 PBS 的消光受限,错误的检测器中检测到光子引起的 QBER 为 0.061%;2)由单光子探测器内部的噪声

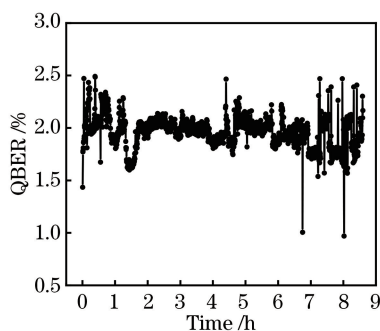


图 12 8 h 内光纤偏振编码 QKD 中量子误码率的演变
Fig. 12 Evolution of quantum bit error rate in fiber polarization-encoded QKD within 8 hours

计数引起的 QBER 为 0.3687%；3) 由系统信道中瑞利散射和拉曼散射引起的 QBER 占 1.532%。由此可得, 系统误码率很大部分是由信道中的散射所引起的, 这主要是因为经典信道的参考光是连续强光。后期对散射光的处理研究至关重要, 如果系统散射噪声得到有效处理, 那么系统的误码率有着很大的改善空间。

为了清楚地展现该偏振补偿系统的稳定性, 利用专门采集单光子探测器的光子计数采集卡, 实时监测单光子探测器的计数, 通过计数的变化可以直观地观察到信号光偏振态的控制情况。因为只要系统稳定运行, 接收到的信号光 SOP 在 PBS 的正交偏振投影几乎就是不变的, 两个单光子探测器的计数稳定, 但是若信号光的偏振态发生变化, 偏振态在 PBS 的正交偏振投影就发生改变, 两个单光子探测器的计数随之发生变化。设置实验在系统量子信道输入 45° 偏振态并在 Bob 端由单光子探测器实时接收, 连续测试 8 h, 两个单光子探测器的计数由采集卡记录, 其随时间的变化如图 13 所示。

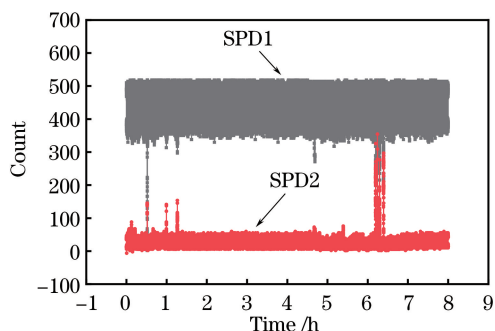


图 13 8 h 内单光子探测器的计数变化
Fig. 13 Count evolution of single photon detector within 8 hours

图 13 显示, 在测试信号光为 45° 线偏振态的 8 h 内, 由采集卡记录的单光子探测器的计数分别稳定

在 0~50 和 350~500 区间, 且有 6 次不同程度的数据突变和恢复。单光子计数小的原因是采集卡的采集频率比单光子探测器的采集频率高, 即采集卡每 0.00125 s 记录一次数据, 而单光子探测器显示的是每秒的计数, 所以采集卡计数大小只有 350~500。而 SPD1 计数大 SPD2 计数小的原因是在解码端进行了相应的控制操作, 使 SPD1 为 45° 线 SOP 的检测器, 因此在 Alice 端发送 45° 线 SOP 后, 理想情况下应该只有 SPD1 响应, 但实际通信时由于单光子探测器的暗计数和偏振变化导致 SPD2 有 0~50 的计数。在整个过程中数据的突变表征外界环境的干扰增强和信道偏振变化加大, 系统探测到的当前信号光的 SOP 跳出程序阈值; 数据的恢复说明偏振补偿系统纠正了信号光的偏振态, 补偿了信道的偏振变化。实验数据显示, 在连续 8 h 的量子密钥测试中, 偏振补偿系统出现了 6 次偏振漂移, 并且能够快速纠正偏振态, 达到系统稳定补偿。

5 结 论

提出一种波分复用式实时偏振补偿系统, 该系统具有稳定共轭态的参考光制备结构, 以及 POD 偏振探测反馈模块, 能实时补偿光纤信道双折射带来的偏振影响。理论和实验显示, 本系统在经典光通信中能有效补偿偏振态至少 30 min, 明显比无补偿情况下的系统偏振控制能力强, 面对随机扰动时偏振态的纠回时间小于 10 s。本系统用于偏分复用系统中时, 可实现非正交偏振关系的偏分复用通信, 并实现了三路信息的同时传输, 在光纤信道的偏振效应得到补偿的前提下, 进一步提高了信息传输容量。在量子密钥分发实验中测试本系统, 可确保偏振编码的光信号在 5 km 的光纤信道中稳定传输 8 h 以上, 其量子误码率为 1.96%。但系统量子误码率大部分是因为散射噪声引起的, 若能有效控制参考光引入的噪声, 那么该偏振补偿系统将更适用于量子 QKD 通信。

参 考 文 献

- [1] Arumugam M. Optical fiber communication: an overview[J]. *Pramana*, 2001, 57(5/6): 849-869.
- [2] Gisin N, Thew R. Quantum communication [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(3): 165-171.
- [3] Pirandola S, Andersen U L, Banchi L, et al. Advances in quantum cryptography[EB/OL]. (2019-06-04) [2020-02-12]. <https://arxiv.org/abs/1906.01645>.

- [4] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560: 7-11.
- [5] Gnauck A H. Advanced amplitude- and phase coded formats for 40-Gb/s fiber transmission [C] // The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, November 11, 2004, Rio Grande, Puerto Rico. New York: IEEE Press, 2004: 605-606.
- [6] Carena A, Curri V, Gaudino R, et al. Polarization modulation in ultra-long haul transmission systems: a promising alternative to intensity modulation [C] // 24th European Conference on Optical Communication. ECOC' 98 (IEEE Cat. No. 98TH8398), September 20-24, 1998, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 1998: 429-430.
- [7] Song Y W, Pan Z, Arieli Y, et al. Enhanced suppression of nonlinearity-induced crosstalk in WDM systems using optical polarization-shift-keying [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 1-6, 2003, Baltimore, Maryland United State, Washington, D. C. : Optical Society of America, 2003, CThQ: CThQ2.
- [8] Goldring D, Zalevsky Z, Mendelovic D. Enlargement of the information capacity in optical fibre channels using polarization coding [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2004, 6(3): S52-S58.
- [9] Heffner B L. Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1066-1069.
- [10] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003.
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] Wang J D, Qin X J, Jiang Y Z, et al. Experimental demonstration of polarization encoding quantum key distribution system based on intrinsically stable polarization-modulated units [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8302-8309.
- [12] Chen J, Wu G, Li Y, et al. Active polarization stabilization in optical fibers suitable for quantum key distribution [J]. Optics Express, 2007, 15(26): 17928-17936.
- [13] Chen J, Wu G, Xu L, et al. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. New Journal of Physics, 2009, 11(6): 065004.
- [14] Xavier G B, Vilela de Faria G, Temporão G P, et al. Full polarization control for fiber optical quantum communication systems using polarization encoding [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1867-1873.
- [15] Ding Y Y, Chen W, Chen H, et al. Polarization-basis tracking scheme for quantum key distribution using revealed sifted key bits [J]. Optics Letters, 2017, 42(6): 1023-1026.
- [16] Xavier G B, Walenta N, Vilela de Faria G, et al. Experimental polarization encoded quantum key distribution over optical fibres with real-time continuous birefringence compensation [J]. New Journal of Physics, 2009, 11(4): 045015.
- [17] Li D D, Gao S, Li G C, et al. Field implementation of long-distance quantum key distribution over aerial fiber with fast polarization feedback [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22793-22800.
- [18] Tang P Y, Li G C, Gao S, et al. Fast polarization feedback algorithm for quantum key distribution with aerial fiber for power grid [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0106005.
唐鹏毅, 李国春, 高松, 等. 针对电力悬空光缆量子密钥分发的高速偏振反馈算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0106005.
- [19] 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.
- [20] Wang G, Zhang Y A, Zhang M L, et al. Dynamic PMD compensator for 40 Gb/s PM-DQPSK system [J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(1): 53-56.
- [21] Lin J C, Xi L X, Zhang X, et al. A combined scheme of polarization mode dispersion compensation and polarization de-multiplexing in a polarization division multiplexing system with direct detection [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 114209.
林嘉川, 席丽霞, 张霞, 等. 偏分复用系统中偏振模色散补偿与偏分解复用一体化方案 [J]. 物理学报, 2013, 62(11): 114209.