

# 光纤量子密钥分发系统的几种偏振补偿技术

王剑 朱勇 周华 苏洋 朱波

解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 偏振补偿是偏振编码量子密钥分发(QKD)系统的一项关键技术。介绍了利用偏振控制器和双向光路进行偏振补偿的基本原理,简述了偏振编码的QKD系统中常用的光纤信道偏振补偿方案,包括双向光路偏振补偿方案,中断式偏振补偿方案,时分复用(TDM)偏振补偿方案和波分复用(WDM)偏振补偿方案。

**关键词** 量子光学;量子光通信;偏振补偿;偏振控制器;双向光路结构

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.090603

## Several Kinds of Polarization Compensation Techniques of Optical Fiber Quantum Key Distribution Systems

Wang Jian Zhu Yong Zhou Hua Su Yang Zhu Bo

College of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210007, China

**Abstract** Polarization compensation is one of the key techniques of a polarization encoding quantum key distribution (QKD) system. This paper introduces the principles of polarization compensation by polarization controllers or a bidirectional optical structure. Some typical polarization compensation schemes suitable for polarization encoding QKD system based on optical fibers are sketched, such as an all-fiber polarization compensation scheme based on a bidirectional optical structure, an interrupting scheme of polarization compensation, a time division multiplexed (TMD) polarization compensation scheme and a wavelength division multiplexed (WDM) polarization compensation scheme.

**Key words** quantum optics; quantum optical communication; polarization compensation; polarization controller; bidirectional optical structure

**OCIS codes** 060.4510; 260.5430; 060.2420

## 1 引言

自1984年美国科学家Bennett和加拿大科学家Brassard提出了第一个量子密钥分发协议——BB84协议<sup>[1]</sup>之后,量子密钥分发走上了高速发展之路。相对于自由空间的直视性以及受天气影响严重<sup>[2]</sup>等问题,光纤具备大容量,抗干扰,低损耗,适合传播量子位等特性,使得光纤量子信道得到人们的青睐<sup>[3-4]</sup>。但是由于光纤信道的偏振特性容易随外界环境的改变而无规则变化,使得基于偏振编码的量子密钥分发(QKD)系统难以跟踪不断演化的光子偏振态,从而大大增加了量子误码率(QBER)<sup>[2-4]</sup>,影响了系统的稳定性。可见,QKD系统要实用化,必须对偏振演化进行补偿。

## 2 偏振补偿的基本方法

偏振补偿方法大体可以分为两类:1)使用偏振控制器进行偏振补偿;2)使用往返双向光路结构,基于光路传输特性进行偏振自补偿。

收稿日期: 2014-04-04; 收到修改稿日期: 2014-04-25; 网络出版日期: 2014-08-19

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012508)

作者简介: 王 剑(1989—),男,硕士研究生,主要从事光偏振补偿技术方面的研究。E-mail: wj198907@126.com

导师简介: 朱 勇(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: jlzhuy@163.com

## 2.1 使用偏振控制器进行偏振补偿的原理

偏振控制器是指能将任意输入的偏振态转变为任意期望输出偏振态的专用偏振控制器件,其原理均是通过双折射效应来使一个偏振态的两个分量产生不同的相位延迟,从而重新生成所期望的偏振态。这种器件不仅在常规光通信中也在 QKD 系统中得到广泛应用。双折射介质可以用琼斯矩阵或者米勒矩阵描述<sup>[5]</sup>。

$$T_j = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} + j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta & j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta \\ j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\varphi}{2} + j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \varphi & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos \varphi) & -\sin 2\theta \sin \varphi \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos \varphi) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \varphi & \cos 2\theta \sin \varphi \\ 0 & \sin 2\theta \sin \varphi & -\cos 2\theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\varphi$  是双折射介质快方向分量与慢方向分量相位差,也叫延迟量;  $\theta$  是快轴与公共轴之间夹角,也叫方位角。从(1)式或(2)式中可以看到,有两个未知参数,即方位角  $\theta$  和延迟量  $\varphi$ ,现有的偏振控制器<sup>[6-9]</sup>都是根据改变这两个变量从而得到任意输出偏振态而设计的。总体可以分为三类:方位角控制型,延迟量控制型以及方位角-延迟量控制型偏振控制器。由于偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度为 3<sup>[10]</sup>,否则就会出现盲区问题<sup>[11]</sup>,所以偏振控制器至少需要 3 个双折射介质,一般由 4 个组成。双折射介质可以是波片,光纤挤压器等。

偏振补偿系统一般是由电动偏振控制器(EPC),偏振探测器以及控制电路组成的闭环反馈系统,如图 1 所示<sup>[12-14]</sup>。通过偏振探测器对偏振光进行偏振检测<sup>[15]</sup>,以检测的偏振态作为反馈量,通过偏振控制算法搜索最优路径,使偏振控制器将偏振态调整到目标偏振态。不同类型的偏振控制器有不同的偏振控制算法,常用的偏振控制算法有遗传算法<sup>[16]</sup>,模拟退火算法<sup>[7-8,17]</sup>,粒子群算法<sup>[18]</sup>,逐渐逼近补偿算法<sup>[13]</sup>,非理想情况下的实时偏振控制算法<sup>[19]</sup>和快速定位算法等<sup>[20]</sup>。

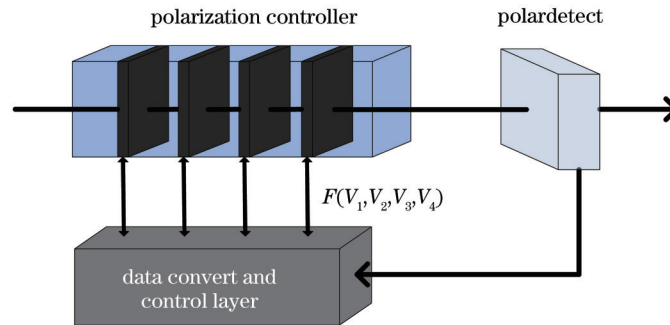


图 1 偏振补偿系统

Fig.1 Polarization compensation system

## 2.2 双向光路结构进行偏振自补偿的原理

双向往返光路结构进行偏振自补偿是指无需测量或是借助外部设备,仅利用光纤的传输特性来补偿偏振态。1989年 Martinelli 在光路中加入法拉第镜,利用法拉第镜反射前后偏振态正交来抵消光路上的偏振扰动<sup>[21]</sup>,设输入偏振态为  $[a + bi, c + di]^T$ , 光纤可看作一系列双折射元件,共有  $n$  个,第  $i$  个用  $T_i$  表示,法拉第镜的传输矩阵用  $F$  表示,则输出偏振态表示为

$$T_1^{-1} T_2^{-1} \cdots T_n^{-1} F T_n \cdots T_2 T_1 [a + bi, c + di]^T = [c - di, -a + bi]^T, \quad (3)$$

从(3)式看出,输出偏振态变为任意输入偏振态的正交态,而不用考虑光线中双折射作用。

2003年华东师范大学研究小组提出了一个利用 Sagnac 干涉仪实现的 QKD 系统,该系统通过 Sagnac 环的平衡光路结构来补偿环境变化所致相位涨落和偏振态扰动的影响<sup>[22]</sup>。近年来有人将这些技术与偏振编码结合,提出了相位调制偏振编码的 QKD 系统<sup>[23-24]</sup>,利用相位调制器通过调节相位进行精确、高效、高速的全光纤偏振控制<sup>[24]</sup>。

### 3 QKD系统的偏振补偿方案

在光纤信道偏振编码的QKD系统中传输的是偏振单光子,因此不能像图1所示那样简单通过分束来进行偏振分析。实现QKD系统中的偏振态稳定传输是其能实用化的关键。现有的QKD系统中使用的偏振补偿方案主要有双向光路偏振自补偿方案,中断式偏振补偿方案,时分复用(TDM)偏振补偿方案和波分复用(WDM)偏振补偿方案。

#### 3.1 双向光路结构实时偏振自补偿方案

利用法拉第镜进行偏振自补偿的一种方案<sup>[4]</sup>如图2所示,其中FM为法拉第反射镜,LD为单光子源,D1和D2为单光子探测器,DL为光纤延时线,用于对返回的光子进行延时,PBS用于分开两个正交的偏振光束,以判决同一测量基的量子比特。Bob随机产生任意线偏振方向光子,向Alice发射,经过光纤传输,被FM反射后在经过光纤逆传输,光子的偏振态旋转了 $\pi/2$ ,在译码时只需要外加一次非运算,将1变0,0变为1就可以解决偏振态旋转 $\pi/2$ 问题,这样光纤引起的偏振态变化得到补偿。这种方案由于采用了不用偏振检测以及反馈控制,所以节省了额外的开销,控制精度高,误码率低,但是由于单光子往返两次通过光纤,所以效率有所下降,传输距离受限,并且易受特洛伊木马攻击<sup>[14]</sup>。

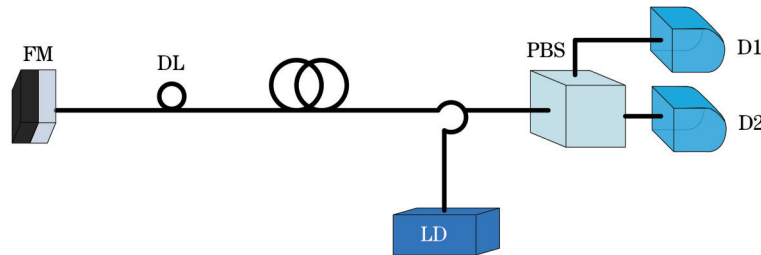


图2 双向光路偏振自补偿方案

Fig.2 Polarization self-compensating scheme based on bidirectional optical structure

#### 3.2 中断式偏振补偿方案

中断式偏振补偿就是把系统工作周期分为“通信”和“偏振补偿”两个状态,即先开始发送密钥,发现系统工作性能严重下降后停止发送密钥并对光纤链路进行偏振调节,然后继续发送密钥<sup>[13,25]</sup>,或者定时进行偏振补偿<sup>[26]</sup>,如图3所示。很明显,这样的补偿方案在密钥分发过程中不能时刻监控光纤链路以及补偿变化的偏振态。如果中断过于频繁,就会长时间占用密钥分发时间,这样降低了系统的成码效率;而如果中断过于稀疏,又会让光子的偏振态变化后得不到及时补偿,QBER将会大大增加。

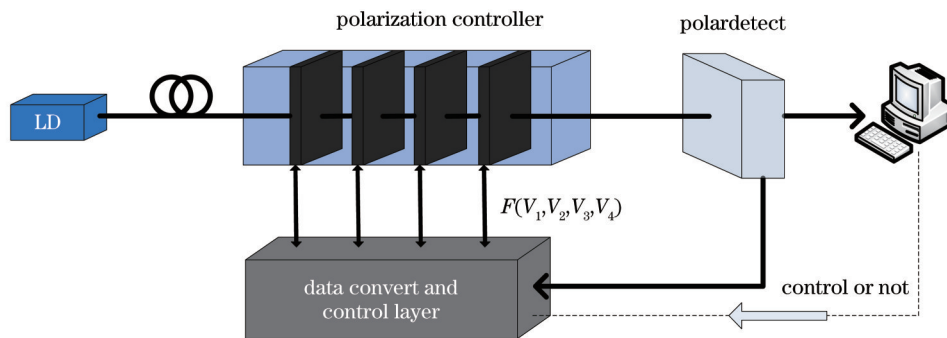


图3 中断式偏振补偿方案

Fig.3 Polarization compensation scheme with interruptions

#### 3.3 TDM实时偏振补偿方案

TDM实时偏振补偿方案的核心思想是把信道传输信息的时间划分成若干时间段,在信号传输间隔对参考光进行偏振检测然后补偿,这样就可以在完全不影响信号光的情况下实现实时的偏振补偿,它保证了密钥分发无中断的运行<sup>[23]</sup>。如图4所示<sup>[28]</sup>,BS1-4是耦合器,Attn1-2是衰减器,PBS1-2是偏振分束器<sup>[29]</sup>,D1-4是单光子探测器。

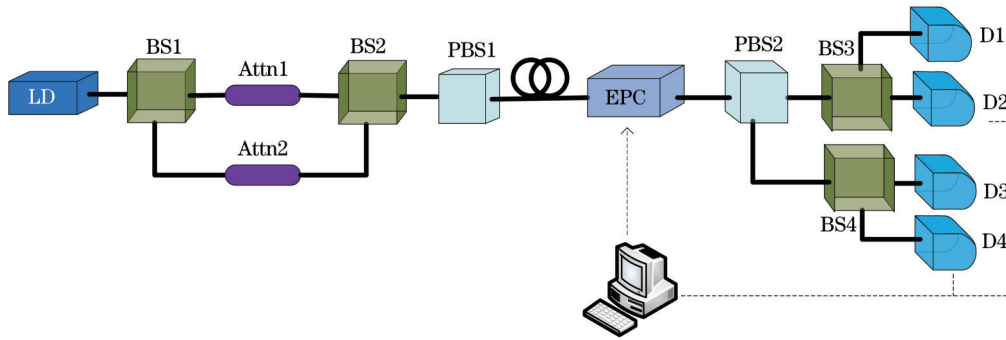


图4 TDM 偏振补偿方案

Fig.4 Polarization compensation scheme based on TDM

这个方案核心是通过不等臂马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪,利用光程差将信号光和参考光区分开来,由于 Attn1 和 Attn2 的衰减系数不同,这样利用单光子探测器的不同工作模式,就可以区分不同衰减的光子,对信号光和参考光独立探测,然后分析参考光偏振信息,反馈给 EPC 进行实时偏振补偿。不过由于参考光与信号光是同波长,所以参考光有可能会干扰量子信号的探测,引起单光子探测器的误计数。这种方案对同步信号的精度要求很高,探测器的门脉冲还要尽量窄,这势必会增加系统的成本。

### 3.4 WDM 实时偏振补偿方案

基于 WDM 实时偏振补偿方案核心思想是选择与信号光波长不同的参考光与信号光同时发送<sup>[27]</sup>。1997 年, Townsend 等<sup>[30]</sup>在一根光纤中测试了复用两个波长实现 QKD 实验的可能性。2008 年, Xavier 等<sup>[31]</sup>利用 WDM 技术完成了实时偏振控制的演示。在这套系统中使用了两个和信号光波长不同但相近的参考光,这两束参考光的传输方向和信号光相反,并且它们的初始偏振态是非正交的。然后通过 WDM 将参考光解复用,并分别进行偏振控制,从而实现了信道中单光子信号的偏振稳定。2009 年, Xavier 等<sup>[32]</sup>对方案改进,将参考光与信号光都放在 Alice 端,减少了瑞利散射和拉曼散射以及背向散射光子引起的误计数。

WDM 偏振补偿方案如图 5 所示<sup>[30]</sup>,将波长分别比信号光波长  $\lambda_q$  大 0.8 nm 和小 0.8 nm 且非正交的参考光  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  放置在 Alice 端,与  $\lambda_q$  一起经 WDM 耦合后在单模光纤里传输, Bob 经过 WDM 解复用参考光并实时检测参考光的偏振态,通过补偿参考光完成量子信号的偏振补偿,使用两个参考光的思想类似数学中的夹逼定理,两个非正交态是因为 QKD 系统中要求至少有两个非正交态<sup>[14]</sup>。这种方案的问题在于不同波长的偏振光经过光纤偏振演化也有所不同,而一个偏振控制器一般只能同时控制一对正交偏振态<sup>[14]</sup>,在图 5 所示方案中由于参考光选用不同波长,所以参考光之间的偏振角会发生变化<sup>[27]</sup>,这给补偿带来一定困难,同时通过一个 EPC 只能尽可能地补偿两个非正交偏振态。

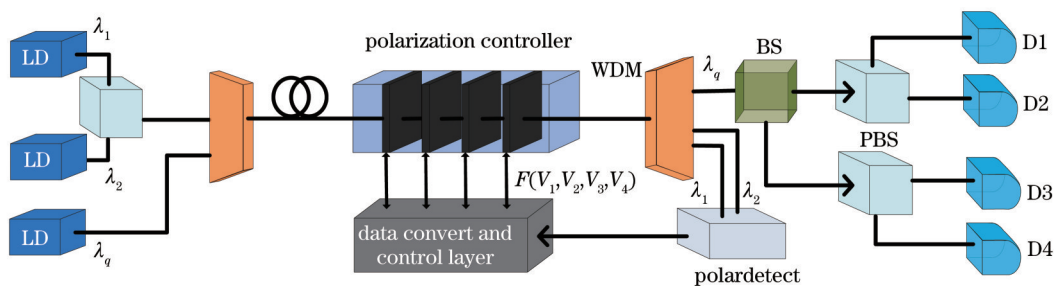


图5 WDM 偏振补偿方案

Fig.5 Polarization compensation scheme based on WDM

## 4 结 论

介绍了几种光纤 QKD 系统中的偏振补偿方案,基于双向光路结构偏振自补偿方案由于无需借助外部设备,仅利用光路结构就可以实现偏振自补偿,但是由于光子往返两次通过光纤,使得传输距离受限,系统效率相对较低,且易受攻击。其他方案都是依据反馈量通过控制算法进行偏振补偿,这种类似的方案依靠的

是偏振控制器的性能以及高效的控制算法,偏振控制器的性能以及高效的控制算法决定了补偿速度以及QBER的大小。中断式偏振补偿易于实现,但是效率低,大约要用10%的时间进行偏振补偿。TDM偏振补偿方案由于参考光与信号光波长相同,因此可以通过补偿参考光达到对信号光的精确补偿,但是参考光有可能会干扰量子信号的探测,引起单光子探测器的误计数,而且对同步信号的精度要求很高,探测器的门脉冲还要尽量窄,因此增加系统的成本。WDM偏振补偿方案可以避免参考光的干扰,在一定程度上降低误码率,具有较好的稳定性,但是由于波长不同,偏振态演化也不同,给偏振补偿带来困难,特别是用一个EPC同时精确地补偿两个非正交的偏振态。

### 参考文献

- 1 C H Bennett, G Brassard. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [C]. Processing of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing, Bangalore India, 1984. 175-179.
- 2 Nicolas Gisin, Gregoire Ribordy, Wolfgang Tittel, *et al.*. Quantum cryptography [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 145-190.
- 3 Ma Ruilin. Quantum Cryptography Communication [M]. Beijing: Science Press, 2006. 41-42.  
马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 41-42.
- 4 Han Baobin. Study on Quantum Fiber Channel and Relevant Technique [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. 9-12, 82-84.  
韩宝彬. 量子光纤信道和相关技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. 9-12, 82-84.
- 5 R M A Azzam, N M Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. North-Holland Publishing Company, 1977. 12-13.
- 6 Zhao Na. Algorithm Study on Polarization Controller [D]. Xi'an: Xi'an University of Post and Telecommunications, 2008. 1-9.  
赵娜. 偏振控制器算法研究[D]. 西安: 西安邮电学院, 2008. 1-9.
- 7 Liu Yang. Research on Polarization Controller and its Control [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008. 28-69.  
刘洋. 偏振控制器及其算法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008. 28-69.
- 8 Huang Chunhui, Rong Weibo. A control scheme of polarization generator based on three LiNbO<sub>3</sub> wave plates [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 052303.  
黄春晖, 荣维波. 三波片型LiNbO<sub>3</sub>偏振态产生器的控制方案设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 052303.
- 9 Zhang Lan, Duan Gaoyan, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Analysis and research of voltage controlled crystal polarization controllers [J]. Photon Technology, 2006, 3(13): 144-149.  
张岚, 段高燕, 张晓光, 等. 电控晶体偏振控制器分析与研究[J]. 光子技术, 2006, 3(13): 144-149.
- 10 Zhang Xiaoguang, Duan Gaoyan, Xi Lixia. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarization [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.
- 11 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *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.
- 12 Zhang Xiaoguang, Fang Guangqing, Zhao Xinyuan, *et al.*. Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 888-891.  
张晓光, 方光青, 赵鑫媛, 等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 888-891.
- 13 Fu Jiannan. Research on and Implementation of Quantum Key Distribution Bases on BB84 Protocol and Polarization Encoding [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. 45-55.  
符剑楠. 基于BB84协议和偏振编码的量子密钥分发研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. 45-55.
- 14 Wu Guang. Long-Distance Quantum Key Distribution System [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. 62-73.  
吴光. 长距离量子密钥分发系统[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. 62-73.
- 15 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.  
汤飞龙, 李中梁, 步扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- 16 Li Weiwen, Jin Xiaofeng, Zhang Xianmin, *et al.*. Application of genetic algorithms in polarization control [J]. Journal of

- Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(3): 443-447.
- 李伟文, 金晓峰, 章献民, 等. 遗传算法在偏振态控制中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(3): 443-447.
- 17 Li Weiwen, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng, *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.
- 18 Lan Baolin. Optical Fiber Polarization Control System Based on the Electro-Optic Crystals [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011. 25-34.
- 兰宝林. 基于电光晶体的光纤偏振控制系统[D]. 浙江: 浙江大学, 2011. 25-34.
- 19 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Real-time polarization control algorithm under non-ideal situation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090604.
- 张启业, 朱勇, 苏洋, 等. 非理想情况下实时偏振控制算法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090604.
- 20 Huang Zhimeng, Zhang Dayong, Cheng Heping, *et al.*. Optical fiber polarization control system based on fast locating algorithm [C]. SPIE, 2013, 8904: 89041C.
- 21 Martinelli M. A universal compensator for polarization changes induced by birefringence on a retracing beam [J]. *Opt Commun*, 1989, 72(6): 341-344.
- 22 Zhou Chunyuan, Wu Guang, Chen Xiuliang, *et al.*. Plug and play' quantum key distribution system with differential phase shift [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(9): 1692-1694.
- 23 Tang Zhilie, Quantum Key Distribution System of Polarization States Encoded by Phase Modulation [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2005. 43-48.
- 唐志列. 相位调制偏振编码的量子密钥分配系统研究[J]. 广州: 华南师范大学, 2005. 43-48.
- 24 Ma Haiqiang, Li Quanyue, Wang Long, *et al.*. A high-speed fiber polarization controller with high accuracy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084217.
- 马海强, 李泉跃, 汪龙, 等. 一种高速率、高精度的全光纤偏振控制方法[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 084217.
- 25 J Chen, G Wu, Y Li, *et al.*. Active polarization stabilization in optical fibers suitable for quantum key distribution [J]. *Opt Express*, 2007, 15(26): 17928-17936.
- 26 Peng C Z, Zhang J, Yang D, *et al.*. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(1): 010505.
- 27 Nelson J Muga, Mário F S Ferreira, Armando N Pinto. QBER estimation in QKD systems with polarization encoding [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(3): 355-361.
- 28 J Chen, G Wu, L Xu, *et al.*. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. *New J Physics*, 2009, 11(6): 065004.
- 29 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.
- 周飞, 费鸿明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062304.
- 30 Townsend P. Simultaneous quantum cryptographic key distribution and conventional data transmission over installed fiber using WDM [J]. *Electron Lett*, 1997, 33(3): 188-190.
- 31 G B Xavier, G Vilelade Faria, G P Temporao, *et al.*. Full polarization control for fiber optical quantum communication systems using polarization encoding [J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1867-1873.
- 32 G B Xavier, N Walenta, G Vilela Faria, *et al.*. Experimental polarization encoded quantum key distribution over optical fibres with real-time continuous birefringence compensation [J]. *New J Phys*, 2009, 11(4): 045015.