

海面泡沫信道的波分复用偏振补偿改进方案研究

徐华彬, 周媛媛, 周学军, 王澍

海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 海面泡沫信道对量子通信中光子的偏振散射提高了偏振误码率。采用波分复用的偏振补偿方案对其进行补偿。在验证波分复用偏振补偿方案可行性的基础上, 针对海面泡沫信道中波长间隔带来的偏振误差问题, 提出了单参考光误差校准偏振补偿改进方案和双参考光偏振补偿改进方案。分别仿真了不同波长间隔下补偿后信号光的偏向角分布。结果显示, 两种方案均可以有效地消除波长间隔带来的影响误差, 其中双参考光偏振补偿方案性能更优, 补偿效果更明显, 但多参考光对实验设备提出更多的要求; 波长间隔取值越小, 补偿后信号光的偏向角越小, 对应的偏振误码率越低。

关键词 量子光学; 海面泡沫信道; 波分复用; 偏振误差; 偏向角分布

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.042701

Wavelength Division Multiplexing Polarization Compensation Improvement Scheme of Sea Foam Channel

Xu Huabin, Zhou Yuanyuan, Zhou Xuejun, Wang Lian

Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The influence of the sea foam channel on the polarization scattering of photons in the quantum communication can lead to the increase of the polarization bit error rate. A polarization compensation scheme based on wavelength division multiplexing (WDM) is used to compensate the state of polarization. Based on the feasibility of the WDM polarization compensation scheme, to solve the problem of the polarization errors caused by the wavelength interval in the sea foam channel, we propose a single-reference-pulse error calibration polarization compensation scheme and a double-reference-pulse error calibration polarization compensation scheme. We simulate the deviation angle distribution of the compensated signal pulse under different wavelength intervals. The results show that the two schemes both can effectively eliminate the polarization bit error rate caused by wavelength interval. The performance of double-reference-pulse polarization compensation scheme is more excellent and the compensation effect is more obvious. However, the multi-reference-pulse scheme has more requirements for laboratory equipment. It is also found that the smaller the wavelength interval is, the smaller the deviation angle of the signal pulse is, and the lower the corresponding polarization error rate is.

Key words quantum optics; sea foam channel; wavelength division multiplexing; polarization error; distribution of deviation angle

OCIS codes 270.5585; 240.1485; 290.5855; 350.6980

1 引言

在卫星与水下航行器进行量子通信的过程中, 海面作为大气信道和海水信道的过渡信道, 其对光子偏振的影响不容忽视。覆盖泡沫的海面就是其中

主要的一种信道(海面泡沫信道), 光子与海面泡沫发生散射的同时, 光子的偏振态也会发生改变。为降低偏振态改变引起的偏振误码率, 偏振补偿必不可少。旋转波片法^[1-6]是目前主流的偏振补偿方案, 主要采用半波片、1/4波片和检偏器等元件进行偏

收稿日期: 2017-08-18; 收到修改稿日期: 2017-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61302099)

作者简介: 徐华彬(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事量子通信方面的研究。E-mail: xhb332526@outlook.com

导师简介: 周媛媛(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事量子通信方面的研究。E-mail: zyy_hjgc@yahoo.com.cn

振控制,通过探测参考光的偏振态,并以此作为反馈量,利用偏振控制算法不断调整检偏元件的旋转角度,将偏振态调至目标偏振态,完成对偏振基准的跟踪,在偏振基准允许的范围内再进行信号光的传输,从而实现偏振补偿的功能。张光宇等^[7]采用平面镜系统建立了自由空间量子通信链路,通过旋转半波片实现了对偏振基准的跟踪,证明了星地量子通信偏振补偿的可行性。但偏振检测补偿和量子通信不能同时工作,为确保量子通信过程中光子偏振态(SOP)稳定,两项操作需交替进行,降低了传输效率。

基于波分复用的实时偏振补偿方案属于旋转波片法的一种延伸。该方案由 Townsend 等^[8]提出,并且实验验证了一根单模光纤上复用两个波长实现量子密钥分发的可能性。Xavier 等^[9-11]利用波分复用技术完成了实时偏振控制的演示。核心思想就是将参考光和信号光同时传输,根据参考光的偏振态,利用偏振控制器^[12-14]实现对信号光的实时偏振补偿,效率相对提高。不过由于参考光和信号光的波长并不相等,泡沫引起的偏振误差也不同,故不能同时实现对参考光和信号光的完全补偿。

本文将波分复用偏振补偿运用到海面泡沫信道环境中,在研究海面泡沫的信道特性的基础上,针对参考光和信号光之间波长间隔带来的偏振补偿误差影响,提出了两种基于波分复用的改进方案,仿真了不同波长间隔下补偿后信号光的偏向角分布,分析了两种改进方案的优缺点。

2 信道模型及偏振误码率分析

2.1 海面泡沫信道

海面泡沫由许多泡沫粒子组成,其对光子的散射作用可以用 Mie 散射理论^[15]分析,光子与泡沫粒子散射所对应的斯托克斯矩阵可以写为^[16]

$$\mathbf{T}(\alpha) = \mathbf{R}(\varphi) \mathbf{M}(u, \alpha, m), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}(\varphi)$ 为关于方位角 φ 的4阶矩阵,定义为旋转矩阵,是为了每次散射过后确定新的散射平面; $\mathbf{M}(u, \alpha, m)$ 为泡沫粒子的穆勒矩阵,包含了泡沫的表面信息,其中 $u = \cos \beta$, β 为散射角; $\alpha = 2\pi r/\lambda$,表示泡沫粒子的周长 r 与入射光波长 λ 的比值; m 为泡沫粒子相对于介质的复折射率。

对于球形散射粒子来说,光子散射时,散射角可以由散射相位函数得到,方位角 φ 在 $[0, 2\pi]$ 均匀分布。因此在海面环境稳定的情况下,海面泡沫的散射系数、半径等参数基本不变,本文主要考虑波长间

隔带来的偏振补偿误差影响。

2.2 偏向角引起的误码率

由光子偏振态改变引起的误码率定义为偏振误码率,用 R_{sop} 表示。偏向角 θ 是指光子的初始斯托克斯矢量和经过演化后到达探测器之前的斯托克斯矢量的夹角,光子通过检偏器的概率为 $\cos^2(\theta/2)$,所以偏振误码率与偏向角的关系为^[17]

$$R_{\text{sop}} = 1 - \cos^2(\theta/2), 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ. \quad (2)$$

由(2)式可知,光子偏振态改变引起的偏向角越大,光子通过检偏器被正确检测的概率越小,从而导致偏振误码率越大。

2.3 蒙特卡罗算法

光子穿越海洋泡沫层的整个过程可利用蒙特卡罗算法来进行模拟。单个光子通过海面泡沫层时,由于泡沫粒子对光子散射的不确定性,无法直接分析海面泡沫对光子偏振态的影响。通过蒙特卡罗算法产生随机数来构建光子的散射作用,样本基数越大,所得到的结果就越接近实际情况。

具体的步骤如下:

1) 光子的初始化

采用偏振编码的 BB84 协议作为量子通信方案。假设所有发射的光子初始坐标为 $(0, 0, 0)$,初始方向为 $(0, 0, 1)$,XOZ 平面选为初始参考平面,则光子相对于参考平面 XOZ 的初始斯托克斯矢量为 $(1, 1, 0, 0)^T$ (水平线偏振光)。

2) 散射步长的确定

光子的随机散射步长 l 由泡沫粒子的散射系数 u_s 和吸收系数 u_a 共同决定,即

$$l = -\frac{\ln \xi}{u_s + u_a}, \quad (3)$$

式中: ξ 为 $[0, 1]$ 的均匀分布随机数。

光子的传播方向 (u_x, u_y, u_z) 为

$$\begin{cases} u_x = \sin \beta \cos \varphi \\ u_y = \sin \beta \sin 2\varphi, \\ u_z = \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

则其散射后的坐标为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} l. \quad (5)$$

3) 中止的判定

本文主要考虑光子穿越泡沫层的过程,光子中止的依据分为两种情况。

a) 被泡沫粒子吸收

光子在与泡沫粒子碰撞时可能会被吸收,衰减

因子定义为

$$u_t = \frac{u_s}{u_s + u_a}, \quad (6)$$

则其散射后的能量为

$$\omega' = \omega \cdot \frac{u_s}{u_s + u_a}. \quad (7)$$

设定好一个能量阈值 ω_t , 若散射后的 ω' 大于 ω_t , 则判定为光子存活, 反之则判定为光子被吸收, 光子传输结束, 发送下一个光子。

b) 到达海水界面

光子并未被吸收, 且散射后光子的坐标已经处于规定的范围之内, 则判定为光子穿过泡沫层, 记录光子的斯托克斯矢量, 发送下一个光子。

3 波分复用偏振补偿基本方案

3.1 方案基本原理

方案基本原理如图 1 所示, 信号光用于执行量子通信功能, 采用 BB84 协议作为量子密钥分发方案, 偏振态随机选择 0° 、 90° 、 45° 、 -45° 中的一种, 波长为 λ 。参考光用于执行偏振补偿操作, 采用固定

偏振态, 波长与信号光的波长相近, 为 λ_1 和 λ_2 , 通过光子检测器 (DET) 对参考光的检测, 将偏振态信息反馈给电动偏振控制器 (EPC), 完成对偏振基准的跟踪。信号光和参考光利用波分复用技术同时在量子信道传输, 在对参考光偏振控制的同时, 完成了对信号光的实时偏振补偿。图 1 中, LD 为光子源, WDM1 为波分复用器, WDM2 为解复用器, OS 为光耦合器, PBS 为光分束器。

经过海面泡沫信道后, 参考光和信号光的斯托克斯矢量分别为 $\mathbf{T}(\alpha + \Delta\alpha)\mathbf{S}_c$ 和 $\mathbf{T}(\alpha)\mathbf{S}_0$, 其中 \mathbf{S}_c 为参考光固定斯托克斯矢量, \mathbf{S}_0 为信号光光子的初始斯托克斯矢量。通过对参考光的检测, 将结果反馈给偏振控制器, 重新把参考光的偏振态调整回固定偏振态, 同时实现了对信号光的偏振补偿。由于参考光与信号光的波长并不相等, 对参考光的完全补偿, 意味着信号光不能被完全补偿, 补偿后的信号光仍存在偏向角, 该偏向角即为补偿后参考光和信号光之间的斯托克斯矢量夹角与补偿前参考光和信号光之间的斯托克斯矢量夹角的差值。

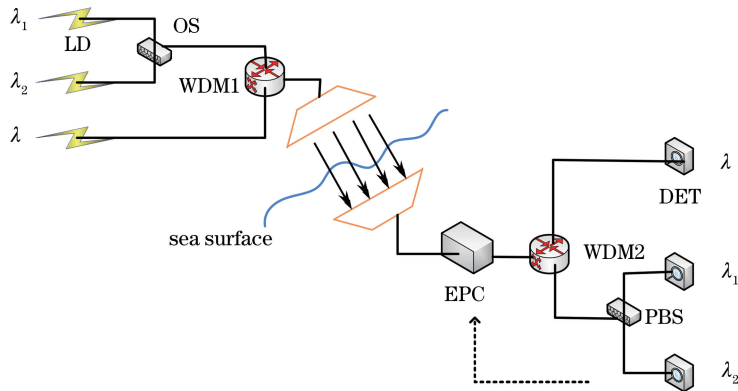


图 1 波分复用偏振补偿方案

Fig. 1 Schematic of polarization compensation based on wavelength division multiplexing

3.2 可行性验证仿真

为简化处理, 假设信号光和参考光光子的初始偏振态均为水平偏振光, 斯托克斯的表达式为 $(1, 1, 0, 0)^T$, 因此补偿后信号光偏向角为 $\mathbf{T}(\alpha + \Delta\alpha) \times (1, 1, 0, 0)^T$ 和 $\mathbf{T}(\alpha)(1, 1, 0, 0)^T$ 的夹角。波长取 500 nm , 发射数目为 1000 个, 波分复用技术采用的波长间隔为 0.8 nm 的倍数。泡沫的半径满足泊松分布, 平均值取 $200 \mu\text{m}$ 。

图 2 为未补偿信号光经过海面泡沫信道后偏向角统计分布。可以发现信号光偏向角出现的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 主要集中在 $0^\circ \sim 10^\circ$, 占了总数的一半以上, 偏向角越大, 出现的光子数越少。根据(2)式可

计算出此时对应的偏振误码率为 4.35% 。

图 3 为单参考光下, 波长间隔取为 $0.8, 1.6, 2.4, 3.2 \text{ nm}$, 补偿后信号光的偏向角统计分布图。从图 3 中可看出: 在引入参考光后, 对信号光的偏振补偿卓有成效, 大多数的光子集中在偏向角很小的区域, 只有少数光子所对应的偏向角较大, 这验证了基于波分复用偏振补偿方案的可行性。而且可以发现: 随着波长间隔的增大, 偏向角分布开始分散。如 $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$ 时, 偏向角主要集中在 $0^\circ \sim 0.5^\circ$; 而 $\Delta\lambda = 3.2 \text{ nm}$ 时, 较大的偏向角出现的次数开始增多。偏向角的增大, 意味着偏振误码率也会随之上升, 所以参考光波长的选取要尽可能地靠近信号光。

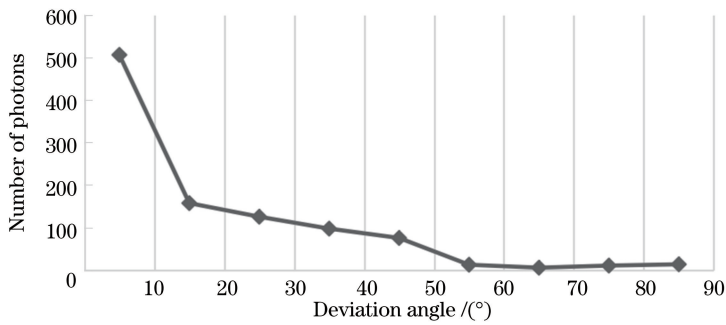


图2 未补偿信号光偏向角分布图

Fig. 2 Distribution diagram of deviation angle of signal pulse without compensation

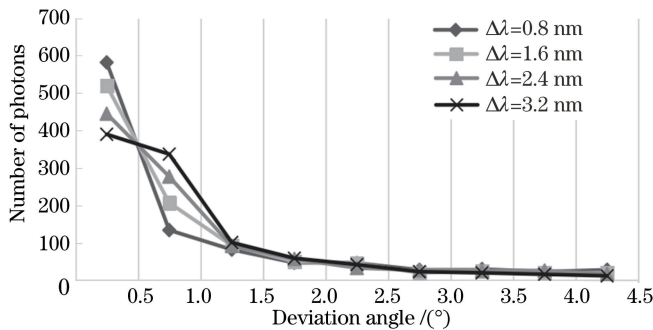


图3 单参考光下补偿后信号光偏向角分布图

Fig. 3 Distribution diagram of deviation angle of compensated signal pulse with single reference pulse

4 改进方案及其仿真

波长间隔的取值会受到实际情况的限制。目前光纤通信波分复用的最优波长间隔能达到 0.8 nm ^[18],然而在自由空间中存在更多干扰。为在一定波长间隔条件下,更好地实现光子的偏振补偿,同时减小波分复用中 $\Delta\alpha$ 带来的误差影响,提出关于海面泡沫信道的两种不同的改进补偿方案。

4.1 单参考光误差校准偏振补偿

在通信之前,通过偏振测量得到 $T(\alpha + \Delta\alpha)S_0$ 与 $T(\alpha)S_0$ 的平均偏振误差,在算法公式中加入一

个初始偏振,再利用对偏振控制器的校准,从而减小 $\Delta\alpha$ 引起的偏向角误差,通过程不再中止。

图4为校准后信号光偏向角统计分布图。与单参考光方案相比,经过校准后的信号光偏向角分布略有改变,主要体现为小偏向角出现的频率增大,这表明偏振校准可提升单参考光偏振补偿效果。不过提升效果不是很明显,分析其原因:一是某些光子原本在经过泡沫后偏振态仍保持良好,但由于在算法中加入了一个初始偏振,光子的偏振误差增大;二是泡沫信道并不是不变的,在通信过程中,偏振误差不断地发生变化,致使某些光子的偏振补偿不到位。

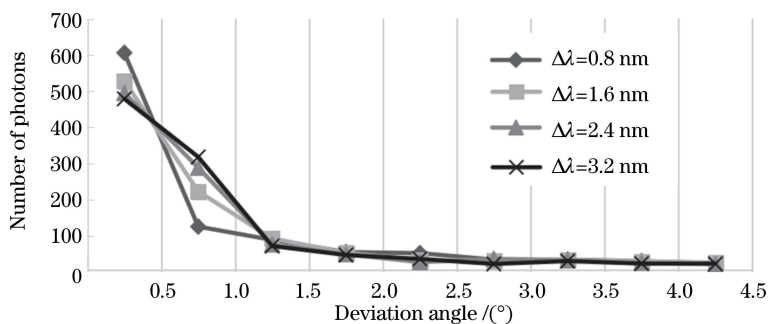


图4 单参考光校准后信号光偏向角分布

Fig. 4 Distribution diagram of deviation angle of compensated signal reference pulse after calibration

4.2 双参考光波分复用偏振补偿

该方案的主要思想是两束参考光同时与信号光复用传输,参考光波长分别选取为信号光两侧同等间隔的波长,在接收到两个参考光后,取两个参考光的中间值 R ,再将其补偿回初始偏振状态,则补偿后信号光的偏向角为 R 和 $T(\alpha)S_0$ 的夹角。

图 5 为双参考光下补偿后信号光偏向角统计分布图,波长间隔仍分别为 0.8 nm 的倍数。从图 5 中可以看出,双参考光偏振补偿效果明显优于单参考

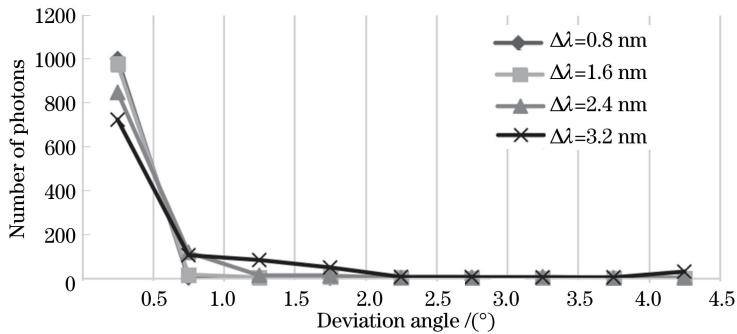


图 5 双参考光下补偿后信号光偏向角分布图

Fig. 5 Distribution diagram of deviation angle of compensated signal pulse with double reference pulses

根据(2)式可计算得到表 1,可以明显看出:与海面泡沫造成的偏振误码率 4.35% 相比,经过偏振补偿后,偏振误码率均保持很低。说明基于波分复用的偏振补偿效果显著。并且波分复用技术选取的波长间隔越小,补偿效果也越好。双参考光系统比单参考光系统更加完善,通过取 $T(\alpha + \Delta\alpha)S_0$ 和 $T(\alpha - \Delta\alpha)S_0$ 的中间值可以基本消去 $\Delta\alpha$ 带来的误差,不过由于两者不完全相等,因此不能完全消除泡沫对光子偏振的影响。若考虑到实验实际技术的限制,也可以通过单参考光误差校准偏振补偿方案来提高补偿效率,而不用增加实验设备。

表 1 各方案补偿后偏振误码率与波长间隔对应表

Table 1 Polarization error bit rate corresponding to wavelength interval after compensation for each scheme

$\Delta\lambda$ /nm	0.8	1.6	2.4	3.6
R_{sop} for single reference pulse / 10^{-3}	0.69	2.40	5.70	9.80
R_{sop} after calibration / 10^{-3}	0.59	1.70	3.60	8.70
R_{sop} for double reference pulses / 10^{-5}	0.17	2.20	3.60	10.0

5 结 论

针对海面泡沫对光子偏振态的影响,采用波分复用实时偏振补偿方案对其进行补偿。分析给出海

光偏振补偿,双参考光条件下,补偿后信号光的偏向角更加集中,更加小。在 $\Delta\lambda = 0.8$ nm 的双参考光偏向角分布基本都在 $0^\circ \sim 0.5^\circ$ 之间。因此在偏振误码率可接受的范围内,使用双参考光偏振补偿方案可以通过提高波长间隔来减小对波分复用技术的要求。不过由于 $T(\alpha + \Delta\alpha)S_0$ 、 $T(\alpha - \Delta\alpha)S_0$ 与 $T(\alpha)S_0$ 的差值并不完全相等,因此不能完全消除 $\Delta\alpha$ 带来的误差影响。同时参考光数目的增加导致了光子检测器的数量也随之增加,提高了实验成本。

面泡沫的斯托克斯矩阵,仿真研究了补偿后信号光的偏向角分布,以及偏振误码率与波长间隔的变化关系,验证了波分复用实时偏振补偿方案的可行性。同时针对复用技术中波长间隔带来的偏振误差,提出了单参考光误差校准方案和双参考光偏振补偿方案。结果表明:双参考光的补偿效果明显优于单参考光;并且波长间隔取值越小,信号光偏向角越集中偏小,对应的偏振误码率也更加低。但在具体实现过程中,波分复用技术实现量子通信仍处于研究阶段,因单参考光方案的技术要求低于双参考光方案,在偏振误码率允许范围内,使用单参考光前期误差校准补偿方案也是可行的。至于波分复用偏振补偿方案是否会给窃听者提供攻击空间,还有待进一步分析研究。

参 考 文 献

- [1] Kothiyal M P, Delisle C. Optical frequency shifter for heterodyne interferometry using counter rotating wave plates [J]. Optics Letters, 1984, 9(8): 319-321.
 - [2] Li Y Q, Zhang X B. Wave plate method based on the rotation of the Stokes polarimeter calibration and error compensation method: 201510011686. 9 [P]. 2015-04-22.
- 李艳秋, 张雪冰. 基于旋转波片法的斯托克斯偏振仪

- 误差标定和补偿方法: 201510011686.9 [P]. 2015-04-22.
- [3] Tang F L, Li Z L, Bu Y, *et al.* Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912005.
汤飞龙, 李中梁, 步扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912005.
- [4] Zhang X B, Li Y Q, Zheng M, *et al.* Calibration and error compensation of an imaging stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0708007.
张雪冰, 李艳秋, 郑猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿 [J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708007.
- [5] Zhi D D, Li J J, Gao D Y, *et al.* Stokes parameter detection and precision analysis based on rotating quarter-wave plate [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(8): 2655-2659.
支丹丹, 李健军, 高冬阳, 等. 基于旋转波片的斯托克斯参量检测与精度分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(8): 2655-2659.
- [6] Tang F L, Li Z L, Bu Y, *et al.* Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters [J]. *Chinese Journal of 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.
- [7] Zhang G Y, Yang Z, Zhang C L. Dynamic polarization-basis compensation for free-space quantum communications [J]. *China Communications*, 2013, 10(2): 27-32.
- [8] Townsend P D. Simultaneous quantum cryptographic key distribution and conventional data transmission over installed fibre using wavelength-division multiplexing [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(3): 188-190.
- [9] Xavier G B, de Faria G V, da Silva T F, *et al.* Two-way quantum communication in a single optical fiber with active polarization compensation [C]. *International Conference on Quantum Communication and Quantum Networking*, 2009, 36: 125-131.
- [10] Sauge S, Swillo M, Albert-Seifried S, *et al.* Narrowband polarization-entangled photon pairs distributed over a WDM link for qubit networks [J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6926-6933.
- [11] Xavier G B, de Faria G V, da Silva T F, *et al.* Feasibility of two-way polarization encoded quantum communication in an optical fiber populated with telecom traffic [EB/OL]. 2009, arXiv: 0912.4433 [2017-07-25]. <https://arxiv.org/abs/0912.4433v1>.
- [12] Yao Y, Shi K. In-line single mode fiber polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5): 636-640.
姚毅, 施昆. 在线单模光纤偏振控制器研究 [J]. *光学学报*, 1995, 15(5): 636-640.
- [13] 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.
- [14] Zhai T, Zhou Y, Zhou J, *et al.* Polarization controller based on embedded optical transformation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17206-17213.
- [15] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [16] Bickel W S, Bailey W M. Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light [J]. *American Journal of Physics*, 1985, 53(5): 468-478.
- [17] Wang J, Zhu Y, Zhou H, *et al.* Simulation research on strategy for wavelength division multiplexing-based compensating photon polarization in optical fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506003.
王剑, 朱勇, 周华, 等. 光纤量子信道的波分复用偏振补偿策略仿真研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506003.
- [18] Li S, Shou G C, Hu Y H. Implementation of superstructure fiber Bragg gratings-orthogonal wavelength division multiplexing and analysis of receiver crosstalk [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1195-1200.
李硕, 寿国础, 胡怡红. 超结构光纤光栅的正交波分复用系统实现方案及接收机串扰分析 [J]. *中国激光*, 2008, 35(8): 1195-1200.