

光纤信道中量子信令的传输损伤及修复策略

阎兆鹏, 聂敏, 杨光

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 通过计算错误量子态与总量子态的比值, 引入误态率的概念, 分析产生误态的原因, 建立量子信令传输损伤模型。通过采用量子中继和全光纤偏振控制器, 提出一种量子态均衡策略。分析该策略对损伤模型的影响, 对量子态在光纤传输过程中的损耗和色散进行补偿。仿真结果表明, 本策略可以降低误态率, 增加量子信令传输误态率低于3%阈值时的有效传输距离。

关键词: 量子信令; 量子态修复; 光纤信道; 误态率

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

Transmission damage and repair strategy of quantum signaling in fiber channel

YAN Zhao-peng, NIE Min, YANG Guang

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The error state ratio is introduced by calculating the ratio of the error qubits and total amount of qubits which have been received. The reason of the error state yielded was analyzed to establish a quantum signaling transmission damage model in fiber channel. A quantum state equilibrium strategy was presented by using the quantum repeater technology and all-fiber polarization control scheme. After analyzing the effect of this strategy on damage model, the loss and dispersion of the quantum state during the fiber transmission will be compensated. The simulation results showed that this equilibrium strategy is able to reduce the error state ratio, and increase the quantum signaling effective transmission distance with the error state ratio below the 3% threshold.

Key words: quantum signaling; pairing of quantum state; fiber channel; error state rate

1 引言

量子信令是量子通信网的重要组成部分。量子通信的正常工作, 离不开量子信令系统的有序运行。目前, 国内外对量子通信进行了大量的理论和实验研究, 并取得了巨大的进展^[1~3]。2006年, 量子保密通信的传输距离达到150 km, 2007年, 量子保密通信在200 km光纤中实现了基于偏振调制的量子密钥分发^[4], 并逐步进入商用阶段。然而, 当量子光信号在光纤信道中进行长距离传输时, 由于环境作用以及光纤本身的因素, 如光纤材质的纯

度、光纤制造工艺、铺设过程中外力作用, 以及光纤本身的一些特征参数的不理想, 光纤信道会产生衰减、各类色散以及其他非线性效应, 会造成光子能量损耗、偏振态改变以及量子退相干。其中量子退相干一直是制约量子网络、量子通信等发展的一个重要难题, 与量子态在信道中的损伤、传输误态之间有密切联系。它会引起量子纠缠度降低, 从而导致量子信令的传输损伤, 致使量子通信的失败。由于光纤信道属于恒参信道, 与环境的隔离性较好, 所以在光纤内传输时, 量子态受外部环境的影响较小。因为与自由空间量子传输相比较, 引起

收稿日期: 2014-01-28; 修回日期: 2014-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172071); 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(2011JK1017)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61172071); The Natural Science Research Projects of Shaanxi Education Department (2011JK1017)

退相干的因素较少，所以相对于自由空间而言，光纤信道的退相干比较容易控制^[5]。因此，研究光子在光纤信道中的传输特性具有十分重要的意义。

为了研究光子在光纤信道中传输损伤特性及损伤修复，提高传输距离和效率，本文通过降低综合光纤色散和损耗的影响，采用量子误态率建立一个损伤模型，并提出一种均衡策略对量子态的损伤进行修复。

2 光纤信道中量子信令传输损伤模型

在量子通信中，信息是由量子态表征的。而在经典数字通信系统中，信息是通过 0、1 码字表示的。量子通信中的误态率，相当于数字通信系统中的误码率，二者都是衡量通信质量的重要指标。为使光子损伤量化，引入光纤传输误态率 $QBER_F$

$$QBER_F = \frac{N_e}{N_c} \quad (1)$$

其中， N_e 表示在一定的时间间隔 t 内出现的误态数， N_c 为接收到的总量子态数。

光纤中损耗的存在，使光纤中传输的单光子的量子脉冲信号随着传输距离的增加存活率不断下降。对于单光子系统，导致量子比特错误判决主要有 2 种原因：一是单光子从错误端口射出 N_E ^[6]；二是暗电流引起的错误比特 N_D ^[7]。

$$QBER_{F0} = \frac{N_E + N_D}{N_c} = \frac{\frac{1}{2}R_s p_D n_T + R_s \mu \eta_i \eta_{det} P_E}{R_s \mu \eta_i \eta_{det}} \quad (2)$$

其中， R_s 为光子脉冲产生频率， μ 为平均光子数， η_i 为光纤中的衰减，由 $\eta_i = 10^{-L\alpha/10}$ 确定， α 为光纤损耗系数， η_{det} 为探测器的量子效率， P_E 为从错误端口出射的概率， p_D 为暗电流产生概率， n_T 为探测器的个数。

色散会使在光纤中传输的光量子脉冲展宽引起串扰，降低门控量子测量效率，并减弱相位干涉对比度。光纤的二阶色散会展宽脉冲在传输过程中的波形，脉冲展宽因子可表示为 $\sqrt{1 + (L|\beta_2|/T_0^2)^2}$ 。这里， L 为光子传输距离，且 $L > 0$ ， β_2 为二阶色散系数， T_0 为初始脉冲宽度。

光纤的一阶色散会影响脉冲 2 个偏振分量到达的时间，而传播的时延差会导致脉冲的展宽，即偏振模色散，一般用 $\Delta\tau_{PMD} = \sqrt{\langle (L|\beta_{1x} - \beta_{1y}|)^2 \rangle}$

$\approx D_p \sqrt{L}$ 来表征偏振模色散对脉冲宽度的影响^[8]。

其中， β_{1x} 、 β_{1y} 分别是光场沿 x 、 y 偏振方向的一阶色散， D_p 为 PMD 参数的平均值，其典型值在 $0.05 \sim 1.0 \text{ ps/km}^{1/2}$ 之间^[9]。为了将色散对误态率的影响表征到公式中，引入探测器选通门宽 W 。由上述讨论可得误态率为

$$QBER_F = \frac{N_D + N_E}{N_c} = \frac{\frac{1}{2}R_s p_D n_T W + R_s \mu \eta_i \eta_{det} P_E}{R_s \mu \eta_i \eta_{det}} \quad (3)$$

考虑光纤一阶色散和二阶色散的影响，将 η_i 、 W 代入可得误态率

$$QBER_F = P_E + \frac{10^{L\alpha/10} p_D n_T \left[T_0 \sqrt{1 + (L|\beta_2|/T_0^2)^2} + D_p \sqrt{L} \right]}{\mu \eta_{det}} \quad (4)$$

其中， P_E 与传输距离无关，它与接收端光子探测器效率以及偏振态或是干涉条纹明暗对比度有关^[6]。

为了简化表达式，定义函数

$$M(L) = \frac{p_D n_T \left[T_0 \sqrt{1 + (L|\beta_2|/T_0^2)^2} + D_p \sqrt{L} \right]}{\mu \eta_{det}} \quad (5)$$

则式(4)变为

$$QBER_F = P_E + 10^{L\alpha/10} M(L) \quad (6)$$

3 均衡策略

要使量子信令能够正确传输，需要采用一种量子通信系统，先对其进行量子中继，以克服在量子态传输过程中损耗和退相干^[10]的影响，使之能够稳定传输。然后对其进行偏振补偿，能够保证其量子比特不发生改变。

3.1 传输损耗均衡

图 1 为目前通用的量子中继模型。

首先，在每个节点以及信源端制备分别制备出纠缠光子对，并将光子对中的一个光子分别发至信源及各节点的下一个节点。由于信道中有退相干的作用，分发出的纠缠光子的纠缠程度会下降，从而会造成信号传输错误，直接影响系统的误态率和保真率^[11]。因此，要由上一级分发过来的纠缠光子对各节点和信宿对进行纯化。在使用极化分束器进行纯化的方案时，以信源分发至节点 1 的纠缠光子对为例，其最大理想纠缠态应为

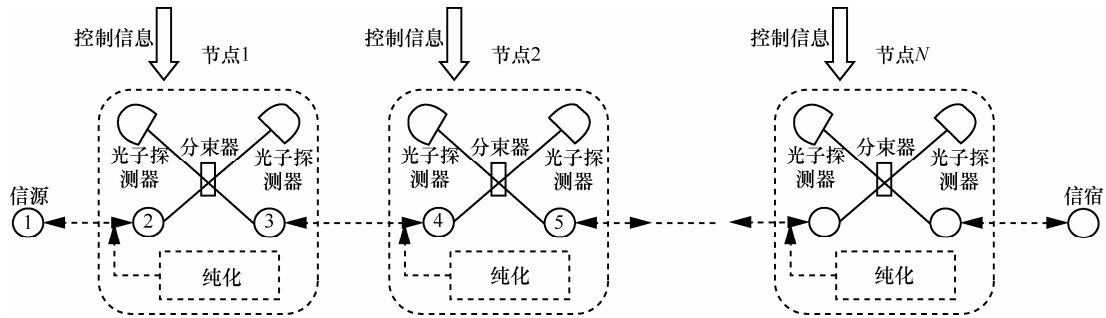


图 1 量子中继原理

$$|\phi^+\rangle_{A1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|H\rangle_A|H\rangle_1 + |V\rangle_A|V\rangle_1\} \quad (7)$$

纯化前混合态的概率密度为

$$\rho_{A1} = F|\phi^+\rangle_{A1}\langle\phi^+| + (1-F)|\psi^+\rangle_{A1}\langle\psi^+| \quad (8)$$

其中，由退相干引起的干扰态为

$$|\psi^+\rangle_{A1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|H\rangle_A|V\rangle_1 + |V\rangle_A|H\rangle_1\} \quad (9)$$

纠缠纯化后，新的子系统概率密度为

$$\rho'_{A1} = F'|\phi^+\rangle_{A1}\langle\phi^+| + (1-F')|\psi^+\rangle_{A1}\langle\psi^+| \quad (10)$$

与纯化前相比，对于 $F > 1/2$ 的期望态 $|\phi^+\rangle_{A1}$ 将占有更多的部分

$$F' = F^2 / [F^2 + (1-F^2)] > F \quad (11)$$

上式中 F 为纯化前态 $|\phi^+\rangle_{A1}$ 的比例， F' 为纯化后态 $|\phi^+\rangle_{A1}$ 的比例。此时纠缠光子对的纠缠度高于系统正常传输所要求纠缠度的阈值，因此可以进行正常的量子信息传输。

利用信源到节点 2 来简要说明纠缠交换过程。在交换开始前，光子 1 和光子 2 处于纠缠态 $|\psi^+\rangle_{12}$ ，光子 3 和光子 4 处于纠缠态 $|\psi^+\rangle_{34}$ 。其中光子 1 在信源处，光子 2 和光子 3 在节点 1 处的纠缠单元内，光子 4 在节点 2 处。光子 2 与光子 1 为一对纠缠光子对，光子 3 与光子 4 为一对纠缠光子对。此时系统初态有一定概率为

$$|\psi\rangle_{1234} = \frac{1}{2}\{|H\rangle_2|V\rangle_1 + |V\rangle_2|H\rangle_1\} \otimes \{|H\rangle_3|V\rangle_4 + |V\rangle_3|H\rangle_4\} \quad (12)$$

系统通过节点 1 中的控制信息，对光子 2 和光子 3 进行 Bell 态测量，产生相应的纠缠分解和坍塌，

上述态变为

$$|\psi\rangle_{1234} = \frac{1}{2}\{|\psi^+\rangle_{23}|\psi^+\rangle_{14} - |\psi^-\rangle_{23}|\psi^-\rangle_{14} + |\phi^+\rangle_{23}|\phi^+\rangle_{14} - |\phi^-\rangle_{23}|\phi^-\rangle_{14}\} \quad (13)$$

当信源进行上述测量后，这个态将随机坍塌到等号右边四项中的任意一项，这个过程会有噪声引入，或者有其他信息的丢失，这样也会引起传输的损伤和误态。国外一些从事量子通信的研究机构和专家分别提出了不同的解决方案^[12-14]。这里为了简化分析，不考虑量子中继对误态率的影响。

至此，一级纠缠交换完成。中继进行了纠缠纯化和纠缠交换，通过贝尔态测量，在信源和信宿之间产生新的纠缠。由于纠缠纯化，能够增加粒子之间的纠缠度，从而降低量子信令在传输过程中的误态率。通过多次级联上述纠缠纯化及交换过程，可对量子信息进行长距离传输。

在传输过程中，当量子信令衰减到一定程度时，需要进行量子中继。加中继后信源和信宿之间又可以恢复到最大纠缠态。因此，当到达信宿端尚未进行偏振补偿时，此时量子态的误态率可表示为

$$QBER_F = 1 - [1 - p_E - M(L_0)]^{fix(L/L_0)} \cdot [1 - p_E - 10^{\text{mod}(L, L_0)/10} M(\text{mod}(L, L_0))] \quad (14)$$

其中， L_0 为相邻中继间的距离，且 $L_0 > 0$ 。 $\text{mod}(L, L_0)$ 表示 L 除以 L_0 的余数， $\text{mod}(L, L_0) = 0$ 表示 L 除以 L_0 余数为 0，所得的 L 处为需要加量子中继的点， $fix(L/L_0)$ 表示 L 除以 L_0 结果取整数。

3.2 偏振模色散均衡

当光子通过信道到达接收端后，由于光纤中的偏振模色散会使光子偏振态发生改变，需要在收端进行偏振态补偿。补偿方案如图 2 所示。

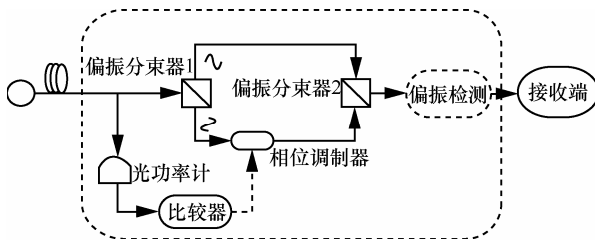


图 2 全光纤偏振控制器

若假设光沿 Z 轴传输，一般的椭圆偏振光可分解为沿 X 轴的线偏振光和沿 Y 轴的线偏振光^[15]

$$\begin{cases} E_{Hx} = E_x^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_x}, E_{Hy} = 0 \\ E_{Vy} = E_y^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_y}, E_{Vx} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, E_{Hx} 、 E_{Hy} 表示水平线偏振光在 X 、 Y 轴上的投影, E_{Vx} 、 E_{Vy} 表示垂直线偏振光在 X 、 Y 轴上的投影。 E_x^0 、 E_y^0 表示水平和垂直线偏振光的振幅, ω 为光的角频率, φ_x 和 φ_y 表示水平和垂直线偏振光的相位。此时椭圆线偏振光矢量可表示为

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} E_x^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_x} \\ E_y^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \\ &= E_x^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_x} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{E_y^0}{E_x^0} e^{i(\varphi_y - \varphi_x)} \end{bmatrix} \\ &= E_x^0 e^{-i\omega t} e^{i\varphi_x} \begin{bmatrix} 1 \\ E^0 e^{i\varphi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $E^0 = E_y^0 / E_x^0$, $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ 。由式(16)所示, 通过改变振幅比 E^0 和相位差 φ , 可以得到期望的偏振光。由此利用 Mach-Zehnder 干涉仪^[4]相位调制的原理对入射光量子偏振态进行调整, 相对于其他偏振调制方法, 该方法采用全光纤光路系统, 具有光路简单、成本低廉、易于操作、稳定性强等特点。这里可通过调节令振幅比 E^0 的值等于 1。

光量子信号到达接收端, 通过光功率计 P 测得入射光光强, 由此可测得入射光的偏振态^[16]。将测得的偏振态反馈进比较器, 与期望偏振态相比较, 从而对入射光偏振态进行调节。入射光通过偏振分束器 PBS1 分成两束强度相等, 偏振方向正交的线偏振光, 不妨定义一束为垂直线偏振光, 一束为水平线偏振光, 经由不同支路传向偏振分束器 PBS2。根据调制信息利用相位调制器电路中的可变电压

对某一支路光的相位进行调制。调制完成后两束光经过相等的光程, 在 PBS2 叠加合束, 得到相位调制后的偏振光, 再经过偏振检测后输出。不同的相位差可以得到不同方向的偏振光, 从而达到偏振补偿的目的。

偏振态的补偿直接影响到所接收量子态信息是否正确。通过在信宿端调节, 消除偏振模色散影响, 降低量子信令误态。此时对经过偏振模色散补偿后的量子信令误态率进行阐述, 消除色散影响因子, 根据式(14)可得此时量子信令误态率表达式为

$$QBER_F = 1 - \left[1 - p_E - M(0) \right]^{fx(L/L_0)} \cdot \left[1 - p_E - 10^{\text{mod}(L, L_0)\alpha/10} M(0) \right] \quad (17)$$

4 仿真与性能分析

定义在量子信令传输过程中, 误态率可以保持不高于 3%阈值的传输距离为有效传输距离。当误态率达到 3%时, 需要进行量子中继。在一般的量子信令通信系统中, 取 $\mu=0.1$, $\eta_{\text{det}}=15\%$, $P_D=10^{-5}/\text{ns}$, $n_T=4$, $T_0=35 \text{ ps}$, $P_E=0.1\%$ ^[1, 6]。对于 1 310 nm 波长其二阶色散 $\beta_2=0$, 衰减率为 $\alpha=0.35 \text{ dB/km}$, 对于 1 550 nm 波长其二阶色散 $\beta_2=-20 \text{ ps}^2/\text{km}$, 衰减率为 $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$ ^[6]。未进行均衡前量子信令传输误态率如图 3 所示。根据仿真结果可以取 1 310 nm 波长, 其中继距离 L_0 为 69 km, 1 550 nm 波长其中继距离 L_0 为 107 km (未进行均衡时误态率首次到达 3%阈值时的传输距离)。加入中继均衡后传输误态率如图 4 和图 5 所示。加入偏振模色散均衡后, 传输误态率如图 6 所示。

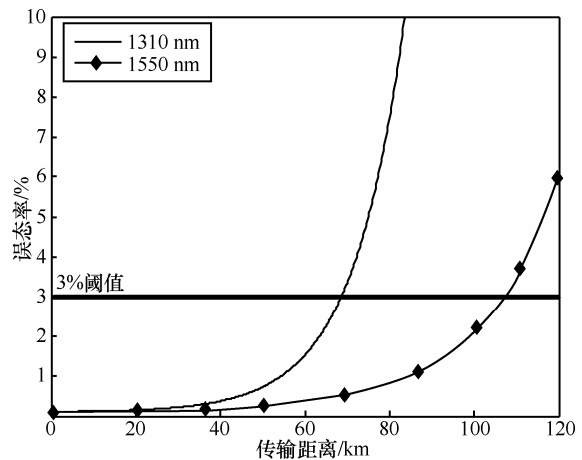


图 3 未进行均衡的误态率

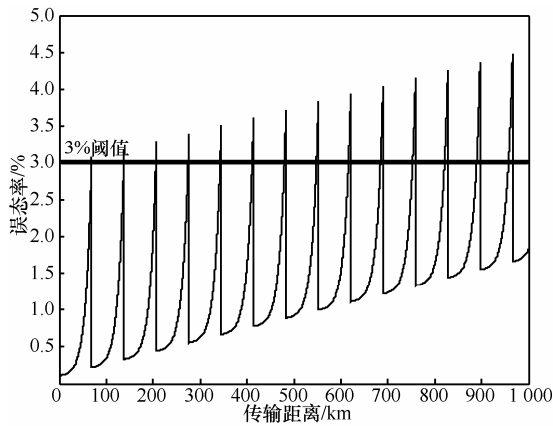


图 4 波长为 1310 nm 经过量子中继补偿后的误态率

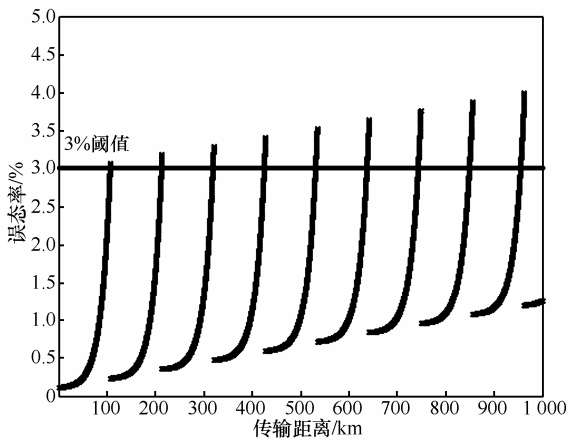


图 5 波长为 1550 nm 经过量子中继补偿后的误态率

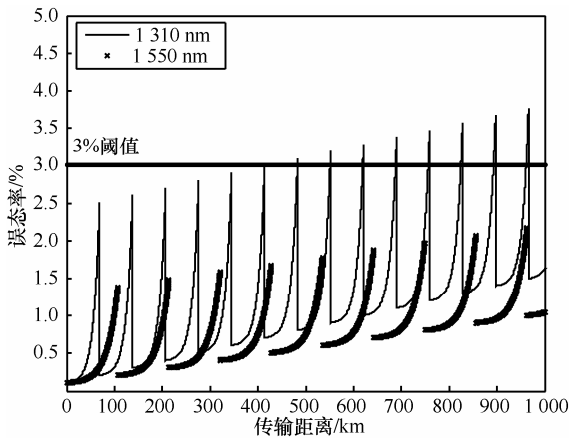


图 6 经过量子均衡后的误态率

如图 3 所示，若不进行均衡，量子信令的误态率依传输距离呈指数规律增长，1550 nm 波长误态率的增长速度要小于 1310 nm 波长。经过量子中继后，如图 4 和图 5 所示，传输距离增加时，误态率得到了一定的扼制。由于偏振模色散、中继器接口和暗电流等一些客观因素的影响，所以中继补偿后误态率不会完全降到理论上的最低值，其传输曲线

的谷值也随着中继级数的增加而增加。通过中继后，误态率会重新依传输距离增加呈指数规律增长，直至下一个中继点。随着传输距离的增加，误态率便会呈现准周期变化。为了对比不同波长的优劣性，若 2 种波长所采用的中继距离不变，以误态率低于 4% 为界限进行比较。此时采用 1310 nm 波长只能传输不到 700 km，其中继级数为 9 级；采用 1550 nm 波长传输中继级数同样为 9 级，而传输距离可达到大于 1000 km。通过对中继级数和传输距离的对比可以看出，1550 nm 波长加入中继后对误态率控制要优于 1310 nm 波长。因此，使用 1550 nm 波长传输量子态时，采用中继策略效果要更优于 1310 nm 波长。如图 6 所示，经过偏振模色散均衡后，误态率进一步降低，有效传输距离得以显著提高。中继级数对量子误态率的影响则依然存在。在中继距离不变的情况下，对于 1310 nm 波长，当传输距离约大于 550 km 时，误态率在中继距离内就开始超出 3% 阈值，再建立中继时所取的中继距离就要小于之前所取的中继距离。而此时对应的 1550 nm 波长传输则还保持在一个相对比较安全的误态率范围。这使 1310 nm 波长传输的理论最大有效距离小于 1550 nm 波长。此外对比其中继级数，此时 1310 nm 波长进行了 7 级中继，而 1550 nm 波长只进行了 5 级中继，甚至可以更少。通过对均衡结果的仿真可以发现，1550 nm 波长的均衡效果优于 1310 nm 波长，对于长距离来说效率要好于 1310 nm 波长，所需中继级数也更少。无论对于 1310 nm 波长还是 1550 nm 波长，加入均衡策略后，均能有效地延长量子信令的有效传输距离，其误态率随着传输距离的增加而呈准周期性的变化，在有效传输距离内可以进行有效的量子信令传输。由此便建立了一个具有高保真度的远距离量子通信策略。在实际应用中，根据不同的需要选择不同的波长。在保证传输量子误态率不超过 3% 阈值的前提下，对传输中继距离进行调整，以提高传输效率，节省传输成本。

5 结束语

量子信令在光纤中传输，由于受到损耗和偏振模色散的影响，其误态率会随着传输距离的增加而增加，从而严重影响量子信令传输效率和质量。通过在信道中加入量子中继以及全光纤偏振控制器，可以有效地增加量子信令的有效传输距离，降低误

态率,可以长距离对量子信令进行高效的传输。

参考文献:

- [1] 郑力明,王发强,刘颂豪. 光纤色散与损耗对光量子密钥分发系统的影响[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2180-2183.
ZHENG L M, WANG F Q, LIU S H. The influence of dispersion and loss on quantum key distribution system[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2180-2183.
- [2] 任娟, 聂敏, 刘晓慧. 量子纠缠信令传输损伤模型及修复策略研究[J]. 量子电子学报, 2012, 29(6): 708-713.
REN J, NIE M, LIU X H. Model of quantum entanglement signaling transmission damage and its repairing strategy[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2012, 29(6): 708-713.
- [3] 裴昌幸, 阎毅, 刘丹等. 一种基于纠缠态的量子中继通信系统[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2422-2426.
PEI C X, YAN Y, LIU D, *et al.* A quantum repeater communication system based on entanglement[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2422-2426.
- [4] 尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013. 202-207.
YIN H, HAN Y. The Principle and Technology of Quantum Communication[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. 202-207.
- [5] 秦媛媛. 光纤量子传输系统性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2009.
QIN Y Y. Performance Analysis of Quantum Transport in Fiber Channel MS Dissertation[D]. Nanjing: Southeast China University, 2009.
- [6] 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.
HAN B B. Study on Quantum Fiber Channel and Relevant Technique[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [7] 马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 56-60.
MA R L. Quantum Cryptography Communication[M]. Beijing: Science Press, 2006. 56-60.
- [8] 刘伟. 单光子量子保密通信及其相关技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
LIU W. Research on Single-Photon Quantum Secure Communication and Related Technology MS Dissertation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [9] 凯泽 G. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012. 95-98.
KEISER G. Optical Fiber Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. 95-98.
- [10] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006. 251-255.
YIN H, MA H X. Introduction to Military Quantum Communication[M]. Beijing: Military Science Publishing Press, 2006. 251-255.
- [11] JULSGAARD B, KOZHEKIN A, POLZIK S. Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects[J]. Nature, 2001, 413(6854): 400-403.
- [12] KUZMICH A, BOWEN W P, BOOZER A D, *et al.* Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles[J]. Nature, 2003, 423(6941): 731-734.
- [13] MANDEL O, GREINER M, WIDERA A, *et al.* Controlled collisions for multiparticle entanglement of optically trapped atoms[J]. Nature, 2003, 425(6961): 937-940.
- [14] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [15] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 362.
YAO Q J. Optical Tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 362.
- [16] 赵环, 马海强, 李亚玲等. 全光纤量子保密通信中的偏振控制[J]. 量子光学学报, 2005 11(2): 74-78.
ZHAO H, MA H Q, LI Y L, *et al.* Polarization control for optical fiber quantum cryptography[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(2): 74-78.

作者简介:



阎兆鹏(1989-), 男, 陕西西安人, 西安邮电大学硕士生, 主要研究方向为量子通信等。



聂敏(1964-), 男, 陕西乾县人, 西安邮电大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为量子通信、量子信息处理等。



杨光(1977-), 女, 陕西西安人, 西安邮电大学讲师, 主要研究方向为通信网的性能与管理、量子通信等。