

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706008

基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传

罗均文, 李云霞, 石磊, 魏家华, 薛阳, 姬一鸣

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘 要: 考虑到少模光纤单模工作时具有低非线性以及损耗、色散保持特性, 提出基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传方案. 使用 Optisystem 构建了基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型, 分析了其传输性能, 并与现有的基于单模光纤的量子-经典信号同传模型进行了对比. 结果表明所提模型可以有效降低现有模型中的非线性效应和信号串扰, 将误比特率降低了两个数量级, 显著提高了信号的传输质量, 可用于量子保密通信大规模网络化.

关键词: 量子通信; 少模光纤; 量子-经典信号同传; 光纤通信; 波分复用

中图分类号: O431.1; O431.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)07-0706008-7

Coexistence of Quantum-classical Signals Based on Single-mode Operation in Few-mode Fiber

LUO Jun-wen, LI Yun-xia, SHI Lei, WEI Jia-hua, XUE Yang, JI Yi-ming

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In consideration of low nonlinearity and maintaining of loss and dispersion when few-mode fiber is operated in single mode, the coexistence scheme of quantum-classical signals based on few-mode fiber operated in single mode was put forward. The coexistence model of quantum-classical signals based on few-mode fiber operated in single mode was built by Optisystem. The transmission performance of the model was analysed and compared with the existing model based on single-mode fiber. The result shows that the nonlinearity and signal crosstalk in existing model have been reduced efficiently in the proposed model. The bit error rate is two orders of magnitude lower than existing model and the transmission quality is improved obviously. It is suitable to apply the proposed model to massive network realization of quantum private communication.

Key words: Quantum communication; Few-mode fiber; Coexistence of quantum-classical signals; Fiber communication; Wavelength division multiplexing

OCIS Codes: 060.2330; 060.5565; 270.5565; 270.5568; 270.5585

0 引言

20 世纪 80 年代以来, 量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)及相应的协议被相继提出且不断发展完善^[1-3], 其无条件的安全性得到充分验证^[4], 基于 QKD 的量子保密通信受到持续关注 and 深入研究. 随着点对点量子保密通信的日益成熟, 如何有效地降低成本并扩大网络规模以获得更广泛的实际应用成为亟待解决的问题.

量子-经典信号共纤同传方案使用现有的暗光纤, 提高了光纤的使用效率, 有效降低了大量敷设光纤可能带来的运营和维护成本, 成为量子保密通信网络化的实用方案. 量子密钥分发根据编码载体的不同, 分为

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61601497)资助

第一作者: 罗均文(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信与量子通信. Email: khd65482@163.com

导师(通讯作者): 李云霞(1966-), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为光纤通信与量子通信. Email: yunxial@sohu.com

收稿日期: 2016-12-22; **录用日期:** 2017-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

离散变量的量子密钥分发(Discrete Variable Quantum Key Distribution, DVQKD)^[5]和连续变量的量子密钥分发(Continuous Variable Quantum Key Distribution, CVQKD)^[6],相应的同传方案分别是离散变量量子-经典信号同传和连续变量量子-经典信号同传. 2015年,离散变量量子-连续变量量子-经典信号同传的方案也被提出^[7]. 在三种方案中,基于单光子的离散变量量子-经典信号同传方案是目前发展最快、最为成熟的方案,所用传输介质和复用技术为单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)和波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术. 然而,单模光纤在同传过程中较大的非线性效应增大了误比特率^[8],信号串扰也较为严重,降低了传输性能. 少模光纤(Few Mode Fiber, FMF)由于具有大的有效面积,可以显著降低非线性效应,并同时具有与单模光纤相当的损耗及色散,单模工作时相当于大有效面积的单模光纤,从而提高传输性能,成为下一代光网络的研究热点^[9].

为了降低量子保密通信中的非线性效应,本文提出了将离散变量量子-经典信号在少模光纤中进行单模同传的方案,分析对比了基于单模光纤以及少模光纤单模工作的量子-经典信号同传方案,使用 Optisystem 分别搭建了相应的模型,将基于单模光纤的同传模型作为参考模型,在基于少模光纤单模工作同传模型中使用线偏振模 LP₀₁模传输信号,两种模型均使用 WDM 技术,并在 50 km 的传输距离上对两种方案的误比特率等参量进行了对比.

1 同传模型

使用 Optisystem 分别搭建基于单模光纤以及少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型,并进行对比分析.

1.1 基于单模光纤的量子-经典信号同传模型

离散变量量子密钥分发产生的密钥是离散变量量子信号. 离散变量量子信号是指采用偏振或者相位等离散物理量来携带信息的单光子信号^[10]. 对于离散变量量子信号-经典信号同传的研究起步较早,根据离散变量量子信号和经典光信号所使用的波长,主要可以分为较远波长隔离和同波段传输两种方案. 其中,同波段传输方法则是指两种信号都以 C 波段波长共同传输,其基本原理如图 1.

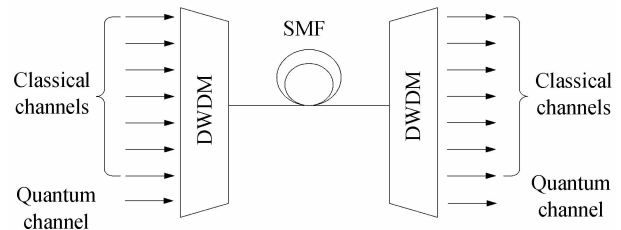
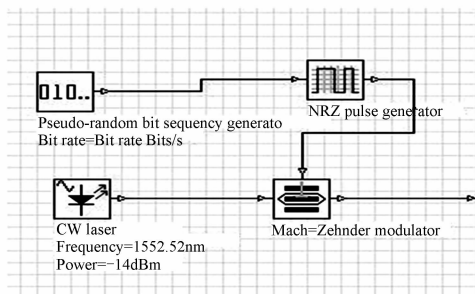


图 1 量子-经典信号同传原理

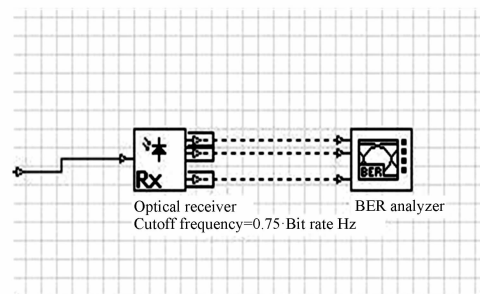
Fig. 1 Scheme of coexistence of quantum-classical signals

采用与 A. J. Shields 团队进行同传实验时相同的参量设置^[11]搭建基于单模光纤的量子-经典信号同传模型(模型 1.1),其中,量子信号与经典信号波长均处于光纤传输低损耗的 C 波段,信道间隔为 100 GHz,并将 1 548.52 nm 波长信道分配给离散量子信号,其余均分配给经典光信号. 为了降低拉曼散射噪声,经典光信号功率降为 -14 dBm,经过 50 km 单模光纤传输后到达接收端功率为 -27 dBm,误码率达到 10^{-12} 量级,达到了无误传输的要求. 发送机和接收机的结构如图 2,模型整体如图 3.

信号源使用普通激光源,各信号光源功率选取 -14 dBm,模拟量子信号由该光源再经 20 dB 衰减得到,数据速率设为 10 Gbit/s,经过 50 km 单模光纤同传后进入接收端,单模光纤的衰减系数 α 取值为 0.18 dB/km,滤波之后使用雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)探测,并由频谱分析仪对信号频谱进行分析,



(a) 1552.52nm classical optical data transmitter



(b) 1552.52nm classical optical data receiver

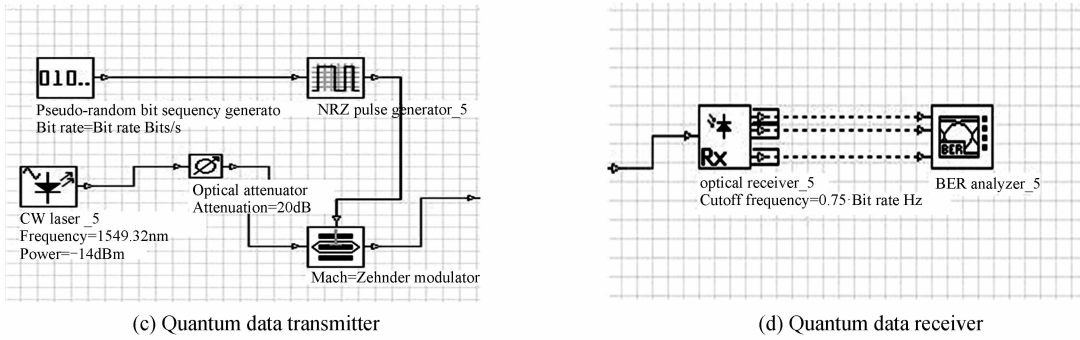


图 2 发送机和接收机的结构
Fig. 2 Structures of transmitters and receivers

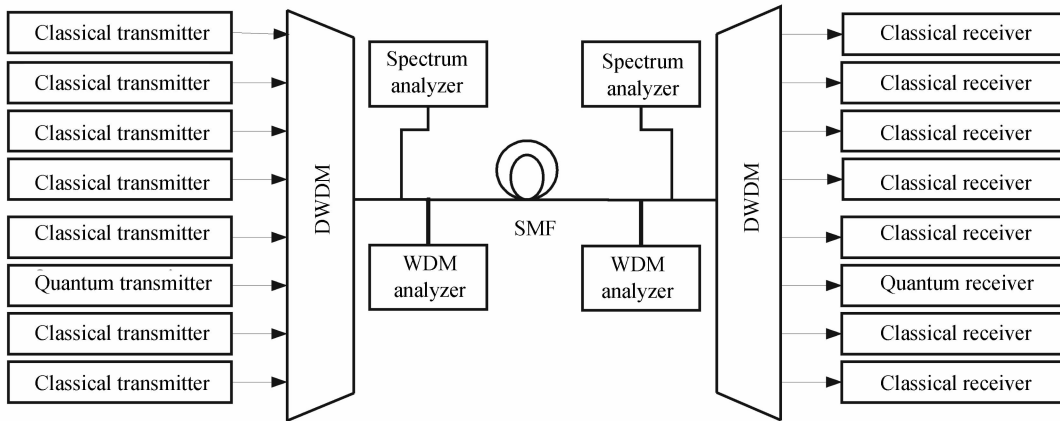


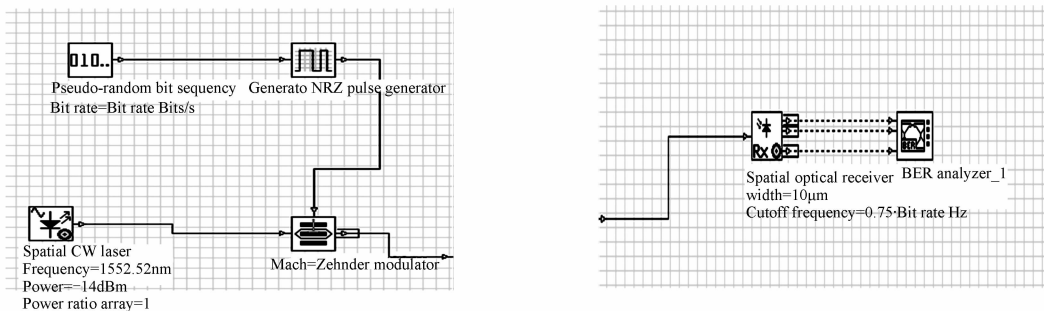
图 3 基于单模光纤的量子-经典信号同传模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the coexistence model of quantum-classical signals based on single-mode fiber
利用波分复用分析仪分析各波长信号的信噪比,使用误比特率分析仪得到各信号的眼图、品质因数 Q 和最低误比特率.

1.2 基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型

少模光纤是指能稳定支持的模式数介于单模光纤和多模光纤之间的光纤,其所容纳的线偏振模之间正交性好,信号串扰较少.当前少模光纤在通信中的应用主要有两种:一种是少模光纤单模工作,主要是利用少模光纤较大的有效面积,降低传输过程中的非线性损伤,达到提高传输性能的目的,且少模光纤单模工作的条件下,不存在模间色散的影响,色散和损耗与单模光纤几乎相同^[12];另一种是少模光纤模式复用,将正交性好的若干线偏振模作为信道,从而大幅提高光纤的传输容量.在单模传输时,选择一个线偏振模传输信号,使少模光纤成为具有单模光纤的传输性能和强抗非线性能力的传输媒质,成为长距离传输的一个新方向^[13].

目前量子保密通信使用的都是单模光纤,但是深受各种非线性效应的影响^[14].为了研究少模光纤单模工作对于离散变量量子信号的传输性能的影响,并与模型 1.1 对比,搭建基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型(模型 1.2),发送端和接收端的内部结构如图 4,模型整体如图 5.



(a) LP_{01} mode 1552.52nm classical optical data transmitter (b) LP_{01} mode 1552.52nm classical optical data receiver

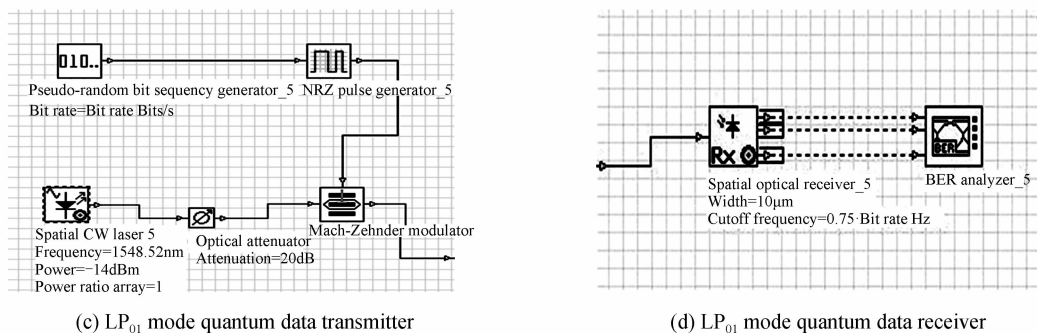


图 4 基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型发送端和接收端的内部结构

Fig. 4 Structures of transmitters and receivers of the coexistence model of quantum-classical signals based on few-mode fiber operated in single mode

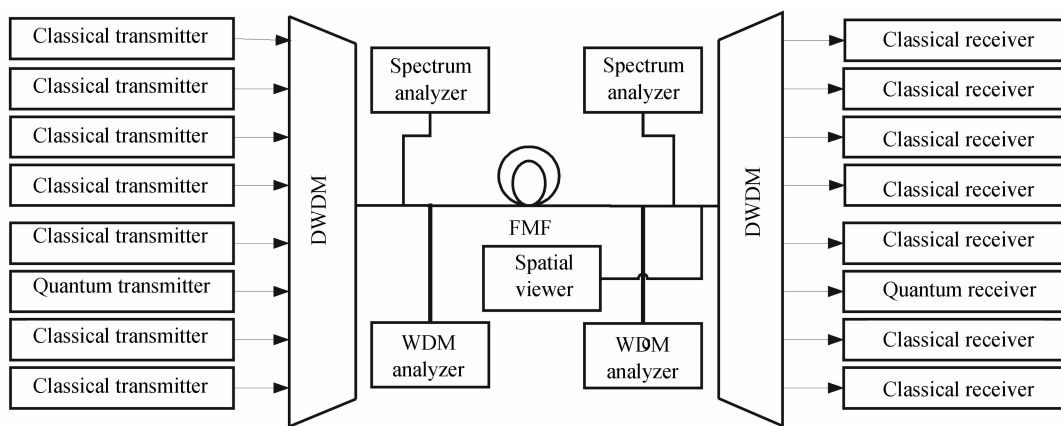


图 5 基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the coexistence model of quantum-classical signals based on few-mode fiber operated in single mode

各信号光源功率选取 -14 dBm, 模拟量子信号由该光源再经 20 dB 衰减得到, 数据速率设为 10 Gbit/s, 经过 50 km 少模光纤同传后进入接收端, 按波长区分各信号后进入空间模式光接收机, 少模光纤参考 OFS 公司的商用两模式光纤的参量设置, 在仅有 LP_{01} 模传输的条件下, 其色散值为 21.1 ps/(nm · km), 与单模光纤色散值相近. LP_{01} 模的模场直径为 $15.6 \mu\text{m}$, 有效面积为 $215 \mu\text{m}^2$, 损耗系数 α 为 0.22 dB/km, 长度设置为 50 km.

所设定的光纤为两模式光纤, 只选择 LP_{01} 模传输信号, 信号源使用空间模式激光源产生 LP_{01} 模, 其模场能量分布如图 6.

同样, 在接收端使用频谱分析仪对信号频谱进行分析, 利用波分复用分析仪分析各波长信号的信噪比, 使用误比特率分析仪得到各信号的眼图、品质因数 Q 和最低误比特率.

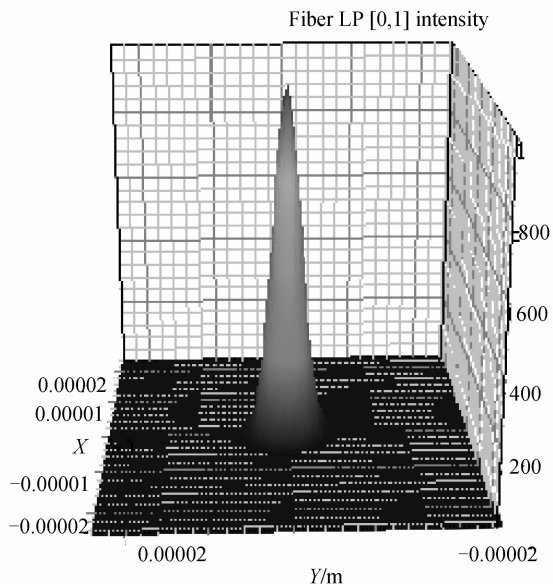


图 6 LP_{01} 模场能量分布

Fig. 6 LP_{01} mode field energy distribution

2 实验结果分析

两个同传模型搭建完成后, 进行仿真实验, 利用模拟仪器得到相应的数据和结果, 并对其进行对比分析. 两个模型的波分复用/解复用端都有频谱分析仪, 所测得信号频谱如图 7.

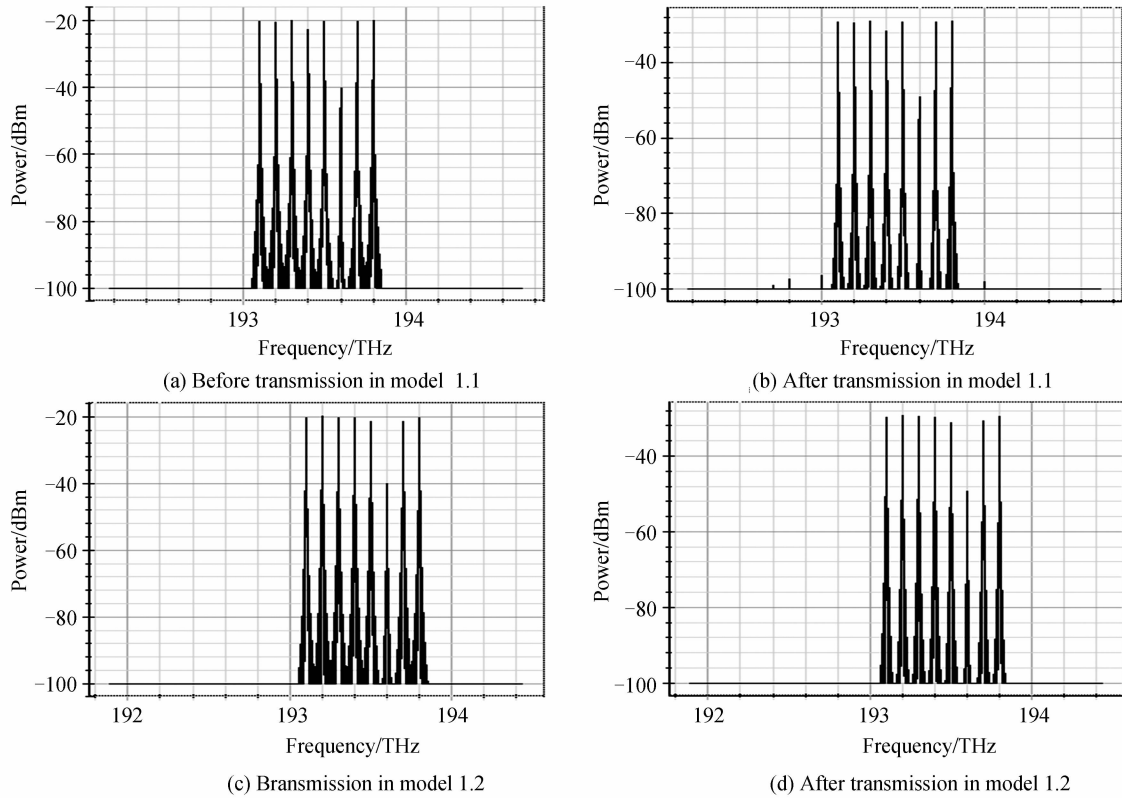


图7 模型 1.1 和模型 1.2 传输前后的信号频谱

Fig. 7 Signal spectrum before and after transmission in model 1.1 and model 1.2

从图 7 可以清楚看到,模型 1.1 中,传输过程中信号不仅被衰减,而且受到了非线性影响,传输后的信号频谱图中出现了明显的噪声,并且范围覆盖了整个信号频谱.而在模型 1.2 中,信号被衰减,但是并没有明显的非线性损伤,可以通过非线性系数 γ 来进行分析^[15].非线性系数 γ 用来衡量光纤中的非线性效应的大小,定义为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}$$

式中, n_2 为硅材料的非线性常量,数值为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{w}$, A_{eff} 为有效面积, λ 为各信号波长.在 λ 一定的情况下,所对应的有效面积 A_{eff} 越大,则非线性系数 γ 越小.仿真实验中所用的单模光纤有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$,而少模光纤对应 LP_{01} 模的有效面积为 $215 \mu\text{m}^2$,是单模光纤的 2.6 倍,可以明显降低非线性影响.由于两个模型发射功率一致,均为 -14 dBm ,输出功率近似,故可以确定模型 1.2 中非线性损伤的降低是由于少模光纤大的有效面积的作用.

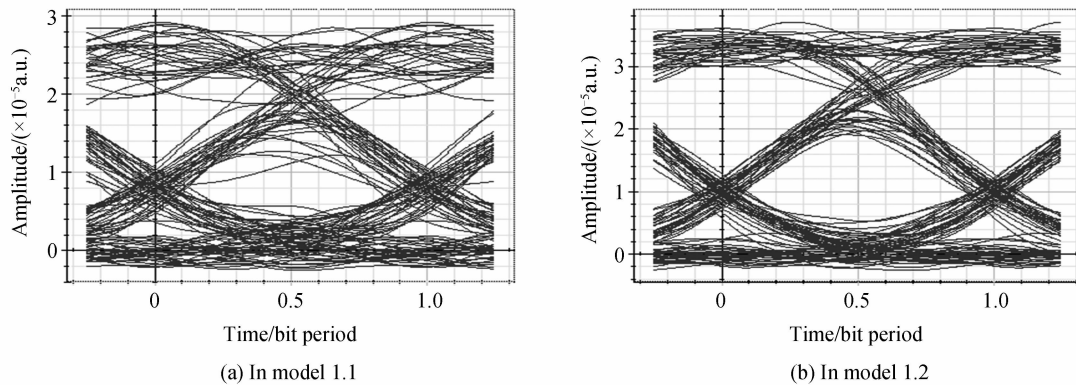


图8 1 552.52 nm 经典信号的眼图

Fig. 8 Eye diagrams of 1 552.52 nm classical signal

为进一步比较两种同传模型对信号传输性能的影响,在两种模型的经典光信号和量子信号接收端分别

使用误比特率分析仪绘出两种信号的眼图,并得到相应的品质因数 Q 和最低误比特率. 由于各波长经典光信号在两种模型中的传输性能优劣具有一致性,为方便起见,选择 1 552.52 nm 光信号作为经典光信号代表,分别得到其在两个模型中的眼图如图 8,离散变量量子信号在两个模型中的眼图如图 9.

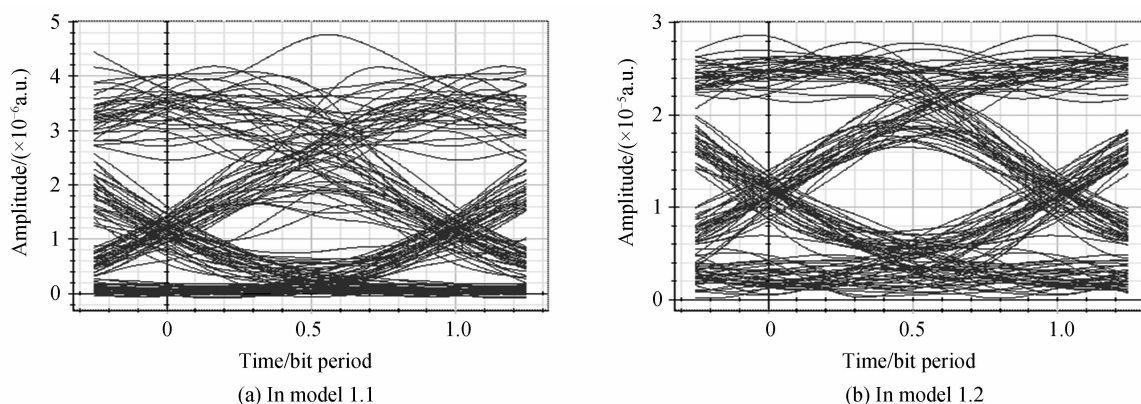


图 9 离散变量量子信号的眼图

Fig. 9 Eye diagrams of discrete variable quantum signal

从图 8 和图 9 可以看到,信号在两种模型中的眼图均有不同程度的闭合,迹线重叠,说明传输时均存在信号间串扰和噪声干扰. 眼图中横坐标均为时间,单位为抽样周期;纵坐标为眼高,单位任意,也可认为无量纲. 在模型 1.2 中,无论是 1 552.52 nm 经典光信号还是量子信号,其眼图张开程度均大于模型 1.1,眼图高度较高,说明模型 1.2 的信号间串扰和噪声干扰较小,这对量子信号的传输十分有利.

两个模型中 1 552.52 nm 经典光信号和量子信号的品质因数 Q 、最低误比特率(Bit Error Rate, BER)以及光信噪比(Optical Signal to Noise Ratio, OSNR)见表 1.

表 1 两模型中部分实验结果
Table 1 Part of the results in both models

Signal	Model	Q	Min BER	OSNR
1 552.52 nm classical data	1.1	8.1	2.4×10^{-16}	67.02
	1.2	8.6	4.9×10^{-18}	67.10
Quantum data	1.1	7.1	4.7×10^{-13}	44.34
	1.2	7.7	6.8×10^{-15}	44.42

由表 1 可知,模型 1.2 中的 1 552.52 nm 经典光信号和量子信号的品质因数 Q 、最低误比特率以及光信噪比均优于模型 1.1,各信号的最低误比特率都比模型 1.1 降低了两个数量级,有效地提高了信号质量,实验所得两个模型的最低误比特率三维图如图 10.

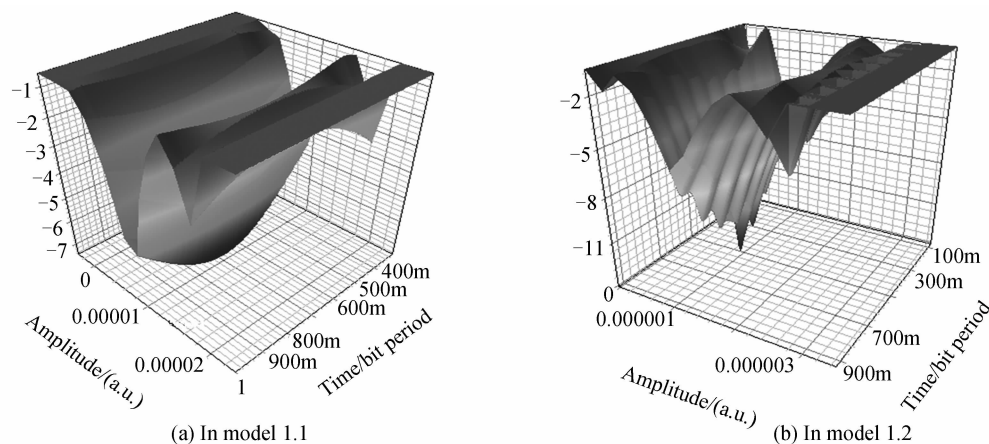


图 10 两种模型所得最低误比特率三维图

Fig. 10 3D graph of minimum BER in two models

通过对模型 1.1 和模型 1.2 的实验结果对比分析,发现模型 1.2 的各项性能要优于模型 1.1,验证了基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传模型具有优良传输特性.

3 结论

本文提出了一种波分复用下的基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传方案,使用 Optisystem 建立了模型,并与参考模型进行对比,结果表明基于少模光纤单模工作的量子-经典信号同传方案能够有效降低单模光纤中的非线性效应的影响和信号间串扰、降低误比特率、提高传输品质因数 Q ,适合作为量子保密通信大规模网络化的同传方案。

然而该方案没有充分利用模式资源,从而使得传输容量没有得到提高,而大传输容量对于数据量剧增的下一代光网络十分重要,并且波分复用器具有较大的插入损耗,下一步研究将围绕基于少模光纤模分复用的量子-经典信号同传进行,在降低非线性效应的同时,充分利用正交性好的线偏振模资源,以提高系统的传输容量。

参考文献

- [1] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, 1984, 175-179.
- [2] LO H K. Decoy state quantum key distribution[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(23): 230504.
- [3] YIN Hua-lei, CHEN Teng-yun, YU Zong-wen, *et al.* Measurement device independent quantum key distribution over 404km optical fibre[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **117**: 190501.
- [4] LO H K, CHAU H F, ARDEHALI M. Efficient quantum key distribution scheme and a proof of its unconditional security[J]. *Journal of Cryptology*, 2005, **18**(2): 133-165.
- [5] LIU Ling-ling, JING Ming-yong, YU Bo, *et al.* Polarization control in single photons phase coding quantum key distribution system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(7): 072701.
刘令令, 景明勇, 于波, 等. 单光子相位编码量子密钥分发系统中的偏振控制[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(7): 072701.
- [6] LIU You-ming, WANG Chao, HUANG Duan, *et al.* Study of synchronous technology in high-speed continuous variable quantum key distribution system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 0106006.
刘友明, 汪超, 黄端, 等. 高速连续变量量子密钥分发系统同步技术研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(1): 0106006.
- [7] LIU Wei-qi. Hybrid quantum private communication with continuous-variable and discrete-variable signals[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
刘维琪. 连续变量及离散变量混合型量子保密通信研究[D]. 西安:西北大学, 2014.
- [8] SUBACIUS D, ZAVRIYEV A, TRIFONOV A. Backscattering limitation for fiber-optic quantum key distribution systems[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(1): 011103.
- [9] SHI Jian. Study on mode division multiplexing technology in few-mode fiber[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
石健. 基于少模光纤的模式复用通信技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- [10] WEI Ya-dong, TANG Zhi-lie, LIU Xiao-bao, *et al.* Study on sending after verify scheme in quantum channel for quantum key distribution system based on polarization coding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1852-1857.
魏亚东, 唐志列, 刘小宝, 等. 基于相位调制偏振态 QKD 系统的量子信道校正发送方案[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1852-1857.
- [11] PATEL K A, DYNES J F, LUCAMARINI M, *et al.* Quantum key distribution for 10 Gb/s dense wavelength division multiplexing networks[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(5): 051123.
- [12] YAMAN F, BAI N, LI Gui-fang, *et al.* Long distance transmission in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 13250-7.
- [13] FU Song-nian, YU Da-wei. Mode division multiplexing transmission over few-mode fiber[J]. *Science & Technology Review*, 2016, **34**(16): 62-68.
付松年, 于大伟. 基于少模光纤的模分复用光传输技术[J]. *科技导报*, 2016, **34**(16): 62-68.
- [14] QI Bing, ZHU Wen, QIAN Li, *et al.* Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**: 103042.
- [15] LIU Jun-yan, ZHANG Jie, HAN Jia-wei, *et al.* Design and optimization of weakly-coupled few-mode fiber with low nonlinearity. [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(3): 8-10.