

# 基于少模光纤模分复用的量子信号-经典光信号共纤同传技术

罗均文, 李云霞, 石磊, 蒙文, 许振宇, 薛阳

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 量子信号和经典光信号共纤同传技术是光纤量子保密通信实用化进程中的关键技术, 该技术可以显著降低量子保密通信网络的建设成本。通过比较离散变量量子信号和连续变量量子信号分别与经典光信号共纤同传的基本原理, 提出了基于少模光纤(FMF)模分复用(MDM)的离散变量量子信号、连续变量量子信号以及经典光信号三者共纤同传的方法, 降低了非线性损伤及噪声, 有效地利用了现有的光纤资源。结合离散变量量子密钥分发技术和连续变量量子密钥分发技术的优势, 构建了更加稳定有效的量子保密通信网络。

**关键词** 量子光学; 量子通信; 共纤同传技术; 少模光纤; 模分复用

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.022702

## Co-Fiber-Transmission Technology for Quantum Signal and Classical Optical Signal Based on Mode Division Multiplexing in Few-Mode Fiber

Luo Junwen, Li Yunxia, Shi Lei, Meng Wen, Xu Zhenyu, Xue Yang

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

**Abstract** The key technology in practical optical fiber quantum private communication is the co-fiber-transmission technology for quantum signal and classical optical signal. The cost of quantum private communication network construction can be decreased remarkably by the co-fiber-transmission technology. The co-fiber-transmission principles of propagating classical optical signal together with discrete-variable quantum signal and continuous-variable quantum signal are compared. The co-fiber-transmission of discrete-variable quantum signal, continuous-variable quantum signal and classical optical signal based on mode division multiplexing in few-mode fiber (FMF) is proposed to reduce nonlinear damage and noise. This new scheme can use the fiber resource efficiently. A stable and efficient quantum private communication network is established when we integrate the technical advantages of discrete-variable quantum key distribution and continuous-variable quantum key distribution.

**Key words** quantum optics; quantum communication; co-fiber-transmission technology; few-mode fiber; mode division multiplexing

**OCIS codes** 270.5565; 270.5568

## 1 引言

近 30 年来,量子密钥分发(QKD)及相应的协议被相继提出且不断发展完善<sup>[1-4]</sup>,其无条件的安全性得到充分验证<sup>[5]</sup>,基于 QKD 的量子保密通信受到全球研究者的持续关注 and 深入研究<sup>[6-9]</sup>。随着点对点量子保密通信技术的日益成熟,如何有效地将其网络化以获得更广泛的实际应用成为研究热点<sup>[10]</sup>。

早期的量子保密通信为避免量子信号和经典光信号的相互影响,使用了物理隔离的方法,即量子信号与经典光信号分别在不同的单模光纤(SMF)中传输,这种方法造成了暗光纤的浪费,并带来很高的运营成本。

**收稿日期:** 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-09-30

**作者简介:** 罗均文(1992—),男,硕士研究生,主要从事量子通信和光通信方面的研究。E-mail: kh65482@163.com

**导师简介:** 李云霞(1966—),女,教授,主要从事量子通信和光通信方面的研究。

E-mail: yunxial@sohu.com(通信联系人)

为了解决这个问题并充分利用原有的光纤网络,量子保密通信开始采用量子信号和经典光信号共纤同传的方法,国内外多个小组对其进行了研究和改良,该方法主要包括离散变量量子信号和连续变量量子信号分别与经典光信号共纤同传两种形式。然而,该方法在信号传输过程中的非线性损伤和信道间相互干扰的问题较为突出<sup>[11-12]</sup>,且随着信息量尤其是经典业务信息的剧增,即使进行了波分复用等处理,单模光纤的传输容量也已经接近极限<sup>[13-14]</sup>,难以适应后期以共纤同传技术为支撑的量子保密通信网络的大容量需求。基于少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)通信技术具有大容量、低损伤、长距离的优势,在光纤通信中得到高度重视,但目前针对量子保密通信的研究中却极少涉及该技术。

本文分析了离散变量量子信号-经典光信号、连续变量量子信号-经典光信号的共纤同传,提出了基于少模光纤模分复用技术的离散变量量子信号-连续变量量子信号-经典光信号共纤同传的方案,降低了单模光纤引起的非线性损伤,且由于少模光纤的模式正交性好,信道之间串扰低,信噪比等指标得到改善,提高了传输距离,从而实现离散变量量子密钥分发(DVQKD)和连续变量量子密钥分发(CVQKD)的整合及后期大容量、低损伤、长距离的量子保密通信组网,并大幅降低成本,为构建量子保密通信网络提供了新的思路。

## 2 量子信号-经典光信号共纤同传

### 2.1 离散变量量子信号-经典光信号共纤同传

DVQKD技术产生的密钥为离散变量量子信号。离散变量量子信号是指采用偏振<sup>[15]</sup>或者相位等离散物理量来携带信息的单光子信号。关于离散变量量子信号-经典光信号共纤同传技术的研究起步较早,根据离散变量量子信号和经典光信号所使用的波长,该共纤同传技术主要分为较远波长隔离和同波段传输两种方案。较远波长隔离方法指共纤同传时量子信号以O波段波长进行传输、经典光信号以C波段进行传输,该方法减弱了拉曼散射噪声的影响。1997年,Townsend等<sup>[16]</sup>按照图1所示的结构进行了共纤同传实验,并通过波长隔离实现复用传输。

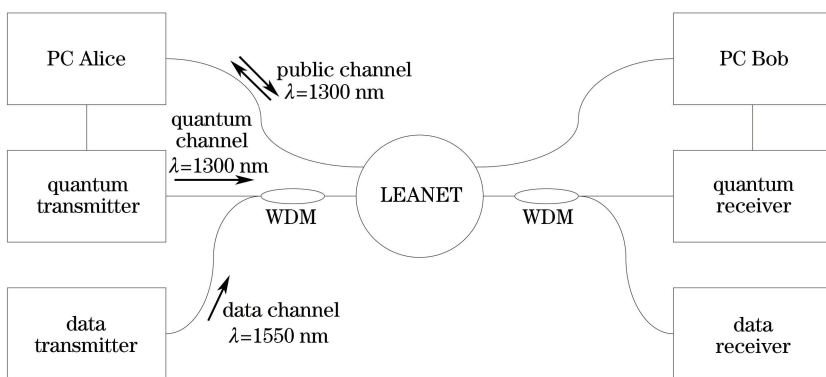


图1 实验结构示意图

Fig. 1 Diagram of experimental structure

2005年,Nweke等<sup>[17]</sup>结合波分复用器(WDM)/解复用器搭建的系统进行实验,通信距离仅为10 km。2009年,Chapuran等<sup>[18]</sup>将Nweke等的实验进行了改进,WDM采用了薄膜波分复用器,降低了插入损耗,提高了传输距离,但发送速率却降低了。2011年,Choi等<sup>[19]</sup>采用差分相移键控调制,提高了量子密钥的发送速率。上述实验参数如表1所示。

表1 较远波长隔离方案实验参数

Table 1 Experimental parameters of large wavelength separation scheme

Reference	Wavelength of QKD channel $\lambda / \text{nm}$	Wavelength of classical channel $\lambda / \text{nm}$	Distance / km	Rate / ( $10^3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ )
BT <sup>[16]</sup>	1300	1550	28	—
LTS <sup>[17]</sup>	1310	1550	10	0.07
Telcordia <sup>[18]</sup>	1310	1550	25	0.006
TNI <sup>[19]</sup>	1310	1550	10	1.3

同波段传输方法指两种信号都以 C 波段波长共同传输。2005 年, Lee 等<sup>[20]</sup>实现了 10 Gbit/s 的经典光信号与量子信号在 C 波段的共纤同传。2010 年, Eraerds 等<sup>[21]</sup>使用了密集波分复用器(DWDM)进行了 C 波段同传实验,并在同传中实现了对经典信息进行同步 QKD 加密。2012 年, Patel 等<sup>[22]</sup>采用粗波分复用器(CWDM)进行共纤同传实验,并使用时域滤波大幅降低了系统误码率,提高了信噪比,实验系统结构示意图如图 2 所示。

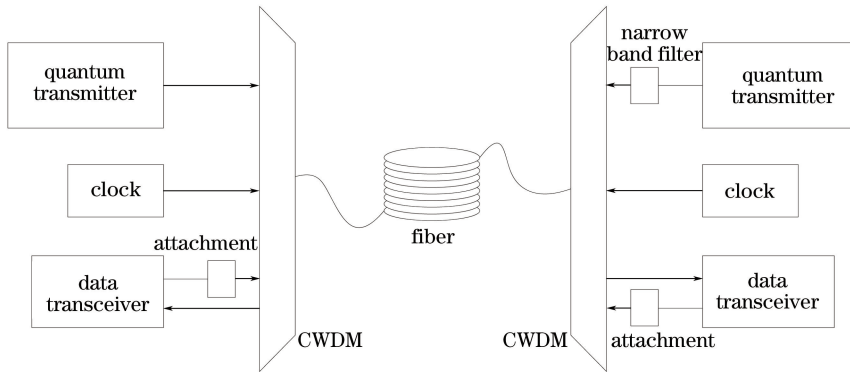


图 2 采用 CWDM 进行共纤同传实验的示意图

Fig. 2 Diagram of co-fiber-transmission experiment by CWDM

2014 年, Patel 等<sup>[23]</sup>将实验系统中的 CWDM 替换为 DWDM,与传输速率为 10 Gbit/s 的经典光信号进行同传,通信距离在 70 km 时安全密钥分发速率达到了 2.38 Mbit/s,实验参数如表 2 所示。

表 2 同波段传输方案实验参数

Table 2 Experimental parameters of same wave band transmission scheme

Reference	Wavelength of QKD channel $\lambda$ /nm	Wavelength of classical channel $\lambda$ /nm	Distance /km	Rate /( $10^3$ bit $\cdot$ s $^{-1}$ )
Ref.[20]	1549.30	1542.90-1555.80	50	—
Ref.[21]	1551.72	1555.33-1555.75	50	0.011
Ref.[22]	1550.00	1591.00-1611.00	50/90	507
Ref.[23]	1548.52	1551.72	70	2380

分析上述两种方案可以得出,离散量子信号-经典光信号共纤同传技术已经取得了较大发展,尤其是同波段传输技术,该技术在取得较远通信距离的同时,密钥分发速率也上升到 Mbit/s 量级。量子信号以单光子的形式存在,始终受到较大的拉曼散射噪声以及经典信息强光的影响,且 DVQKD 过程中所使用的单模光纤的非线性损伤较大,使得原本就很弱的信号质量进一步下降,这将限制该技术的进一步发展。

## 2.2 连续变量量子信号-经典光信号共纤同传

CVQKD<sup>[24]</sup>产生的密钥是连续变量量子信号。连续变量量子信号的信息载体为光场中彼此正交且连续变化的物理量。相对 DVQKD 而言, CVQKD 的研究起步较晚<sup>[4]</sup>,连续变量量子信号-经典光信号共纤同传技术近几年才得到广泛关注。连续变量量子信号-经典光信号共纤同传技术的原理示意图如图 3 所示。图中 EDFA 为掺铒光纤放大器。

2009 年, Qi 等<sup>[11]</sup>利用 C 波段的 DWDM 将经典光信号分别与诱骗态(Decoy-state BB84)QKD 协议和高斯调制相干光源 QKD 协议产生的密钥复用同传,结果表明连续变量量子信号-经典光信号共纤同传方式的抗噪性能优于单光子传输方案,且当参与复用的经典信道数为 38 时,仍能取得 10 km 的安全通信距离。

2015 年, Kumar 等<sup>[25]</sup>利用 DWDM 实现连续变量量子信号与若干 C 波段经典光信号的共纤同传,并验证了系统的噪声容限。

2015 年, Wang 等<sup>[26]</sup>利用相位补偿技术和偏振反馈算法,搭建了稳定的 CVQKD 系统,该系统可稳定运行 12 h,传输距离为 50 km 处的安全密钥率为 52 kbit/s。同年, Huang 等<sup>[27]</sup>采用 CWDM 将连续变量量子信号、经典光信号和时钟信号复用传输,安全密钥率达 1 Mbit/s,三种信号复用传输的实验系统原理图如图 4 所示,实验参数如表 3 所示。

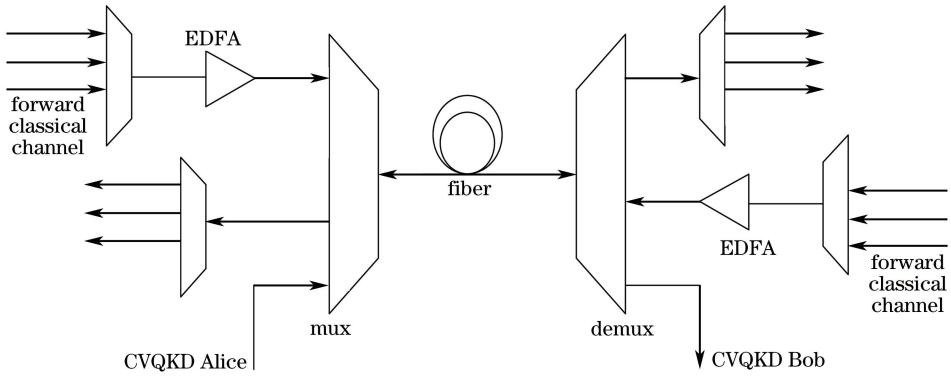


图3 连续变量量子信号-经典光信号共纤同传技术的原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of co-fiber-transmission technology for continuous-variable quantum signal and classical optical signal

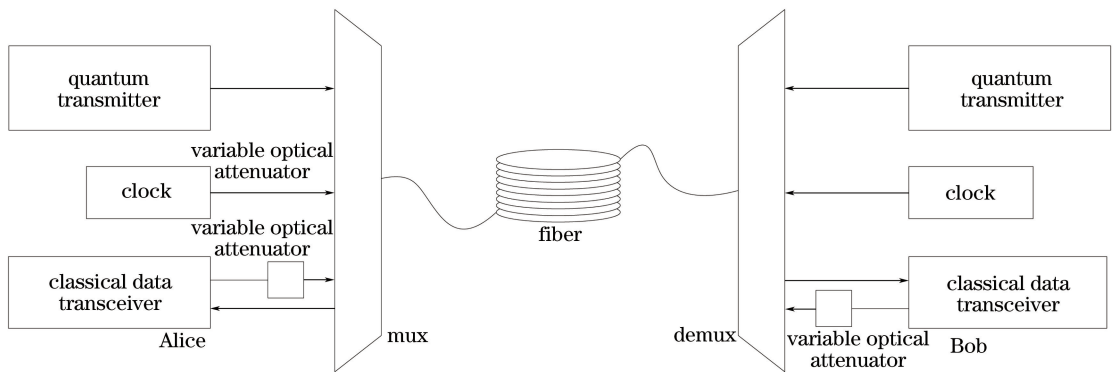


图4 连续变量量子信号、经典光信号和时钟信号共纤同传的实验系统原理图

Fig. 4 Experimental system diagram of co-fiber-transmission for continuous-variable quantum signal, classical optical signal and clock signal

表3 连续变量量子信号-经典光信号共纤同传方案实验参数

Table 3 Experimental parameters of co-fiber-transmission for continuous-variable quantum signal-classical optical signal scheme

Reference	Wavelength of QKD channel $\lambda$ /nm	Wavelength of classical channel $\lambda$ /nm	Distance /km	Rate /( $10^3$ bit $\cdot$ s $^{-1}$ )
Ref.[11]	1554.94	1559.79	30	—
Ref.[25]	1530.12	1550.12	75	0.49
Ref.[26]	1550.12	1310, 1410, 1430	50	52
Ref.[27]	1550.00	1550, 1570, 1610	25	1024

连续变量量子信号单个脉冲的光子数多于离散变量量子信号,其抗干扰能力更强,且连续变量光源制备简单,CVQKD 密钥分发速率高于 DVQKD。由于连续变量量子信号强度比经典光信号强度弱,因此连续变量量子信号仍受拉曼散射噪声以及经典光信号的影响,单模光纤的非线性效应也会影响连续变量量子信号的通信质量。

### 3 基于少模光纤模分复用技术的量子信号-经典光信号共纤同传

随着 DVQKD 和 CVQKD 技术的不断发展,点对点量子保密通信方式也已经得到应用,相关的共纤同传方案也得到了广泛的研究,量子保密通信的网络化成为大规模实用化的关键。为了与现有光通信网络充分融合和最大限度地降低建设和运营费用,兼顾两种共纤同传方案的优势,实现离散变量量子信号、连续变量量子信号和经典光信号的共纤同传是一种较好的选择<sup>[28]</sup>。大数据时代对下一代光通信传输的容量也有很高的要求,基于少模光纤的模分复用技术的量子信号-经典光信号共纤同传方案是解决该问题的一个新思路。

### 3.1 基于少模光纤的模分复用技术的发展历程及基本原理

模分复用最早在 20 世纪 80 年代被提出<sup>[29]</sup>,但由于当时光通信技术水平的限制,该设想始终难以实现。2010 年, Yaman 等<sup>[30]</sup>采用少模光纤进行了传输距离为 1050 km 的实验,但该实验并不是为了研究基于少模光纤的模分复用技术。自 2011 年起,基于少模光纤的模分复用技术成为全球未来光技术研究的热点<sup>[31-32]</sup>。

光纤中的模式是指在特定条件下的麦克斯韦方程组的解,即能量在空间的分布形式。模分复用指利用光纤中相互正交的各个模式作为一个独立的信道来传输信息的一种复用方式,本质上是一种光的多输入多输出(MIMO)过程<sup>[33]</sup>。理想情况下,传输信息的模式间相互正交,模式间不存在模式耦合,可实现信息共纤同传并且信道间无串扰,这对微弱的量子信号的传输十分有利。传统的单模光纤在利用时分复用、波分复用、正交频分复用及偏振复用等复用技术后可大幅提高传输容量,但其传输容量已经接近极限,无法满足后续的大数据传输要求。多模光纤(MMF)由于模式间串扰很严重,不适合作为模式复用的载体。少模光纤的模式数为 2~10 个,具有较为稳定的正交模式。与单模光纤相比,少模光纤具有较大的模场面积,有效减小了单位光纤面积上的功率强度,降低了高功率入射造成的拉曼散射等非线性损伤,且保持单模光纤的传输损耗特性。相比于多模光纤,少模光纤的模式色散和串扰问题得到很大程度的优化,因此基于少模光纤的模分复用是一种全新的长距离、低损伤、大容量的光传输方案<sup>[34]</sup>,其原理示意图如图 5 所示。

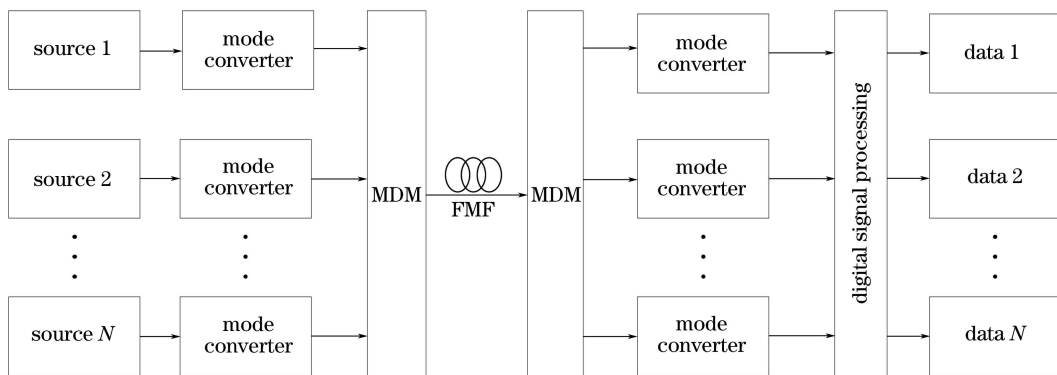


图 5 基于少模光纤的模分复用的原理示意图

Fig. 5 Principle diagram of MDM based on FMF

### 3.2 方案设想及关键技术

针对离散变量量子信号-经典光信号共纤同传以及连续变量量子信号-经典光信号共纤同传中非线性损伤大、信号间串扰大、传输容量低等特点,提出了采用基于少模光纤的模分复用技术进行离散变量量子信号-连续变量量子信号-经典光信号共纤同传的新型量子保密通信系统,其结构示意图如图 6 所示。

基于模分复用的新型量子保密通信系统中各信号的传输和处理过程如下:

1) CVQKD 产生密钥,即连续变量量子信号;DVQKD 产生密钥,即离散变量量子信号。

2) 连续变量量子信号、离散变量量子信号、经典光信号进入模式转换器,分别选择不同且相互正交的模式;选择基模的信号可以直接使用单模光纤激发,其余信号选择高阶模,并通过基模进行转换。

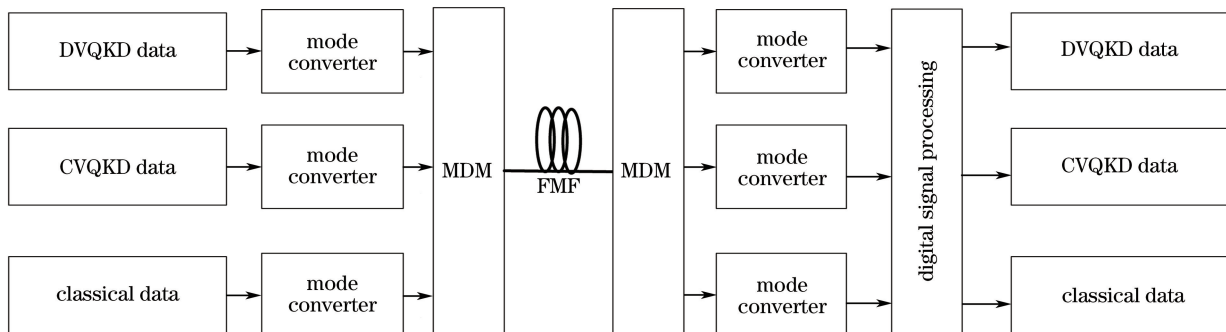


图 6 基于模分复用的新型量子保密通信系统结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of new quantum private communication system based on MDM



- 3) 三种信号进入模分复用器进行模分复用,并将模分复用之后的三种信号在同一少模光纤中进行传输。
- 4) 三种信号到达模分解复用器进行解复用,再进入不同模式转换器进行模式逆转换。
- 5) 各信号进行模式转换之后,由光探测器进行探测,再进入数字信号处理模块进行光 MIMO 均衡,对传输过程中的信号损伤进行补偿,对信号进行放大,并消除模式耦合。
- 6) 各信号到达接收机,完成信息传输。

基于少模光纤模分复用技术的研究起步较晚,其应用面临诸多困难,所提方案中涉及的关键技术难点主要包括以下几方面。

1) 少模光纤的性能优化。对于用于模分复用的少模光纤而言,首先需考虑少模光纤中稳定存在的正交模式数量,这直接影响到少模光纤的传输容量。其次,少模光纤应具备较小的非线性损伤、模式色散以及模式耦合。离散变量量子信号和连续变量量子信号的光子数水平都较低,容易受到拉曼散射噪声的干扰,甚至连续变量量子信号对离散变量量子信号、经典光信号对连续变量量子信号和离散变量量子信号都可能存在干扰,因此需要对少模光纤进行进一步的性能优化。模式数量的控制取决于归一化频率的大小,非线性损伤的降低得益于模场面积的增大。经过工艺的改进以及光纤结构的优化,目前已经有稳定的 4 模式甚至 6 模式的复用实验,并且大模场面积使得少模光纤在降低非线性损伤的同时保持单模光纤的低色散性能。

2) 模分复用器/解复用器的性能优化。模分复用器具有比波分复用器更低的插入损耗,这也是本方案选择模分复用的一个原因。但是,引入低光子数水平的量子信号后,仍然需要对模分复用器和解复用器进行性能优化,主要体现在提高模式耦合/分离比、提高模式隔离度、降低插入损耗、提高集成度等方面,其中提高模式隔离度将有效降低模式色散和模式之间的串扰。现有的模分复用器/解复用器主要包括基于光纤熔融型、基于长周期光纤光栅、基于自由空间光学以及非对称平面光波导型的模分复用器/解复用器。其中,非对称平面光波导型模分复用器因具有结构简单、模式转换效率高、易于集成的优点,更适合复用通信。

3) 光 MIMO 均衡算法的优化。信号解复用到达接收端之前,需要经过数字信号处理模块对信号进行色散补偿、光 MIMO 均衡、损伤补偿,还需要消除信号传输过程中的模式耦合,并进行模数转换。算法优劣可能直接影响信噪比,尤其对于微弱的离散变量量子信号而言,传输过程中极易受到各种非线性损伤,因此设计高效的均衡算法显得尤为重要<sup>[35]</sup>。在现有的光 MIMO 均衡算法基础上,降低运算复杂度、增加补偿的模式数量成为算法优化的发展趋势。

本研究方案使用基于少模光纤的模分复用技术实现了离散变量量子信号-连续变量量子信号-经典光信号的共纤同传,在信号进入模式转换器之前,部分信号仍然可以依托现有的光纤到户的单模光纤网络,因此本方案可作为接入量子保密通信骨干网的手段。与原有的共纤同传方案相比,本方案可解决单模光纤存在的非线性损伤大、传输容量接近极限的问题,少模光纤的特殊结构使本方案具有低损耗、大容量和长距离传输的优势,且实现了 DVQKD 和 CVQKD 的整合,可充分利用现有光纤网络,降低了量子保密通信组网所需的成本。

## 4 结 论

研究了离散变量量子信号-经典光信号以及连续变量量子信号-经典光信号共纤同传的方案,对比了相应的实验参数以及性能。这两种方案使用了单模光纤,传输容量受到限制,并且受非线性损伤、噪声以及经典光信号的影响,难以作为量子保密通信的组网方案。提出了基于少模光纤模分复用的量子信号-经典光信号共纤同传方案,介绍了该方案的原理,分析了该方案涉及的关键技术,并给出了相应的解决思路。在充分利用现有光纤网络的同时,该方案也可以作为接入量子保密通信骨干网的手段,具有低损耗、大容量和长距离的优势,降低了量子保密通信组网的成本,为后期量子保密通信组网提供了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560: 7-11.

- [2] Bennett C H. Quantum cryptography using any two non-orthogonal states[J]. Physical Review Letters, 1992, 68(21): 3121-3124.
- [3] Ekert A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(6): 661-663.
- [4] Ralph T C. Continuous variable quantum cryptography[J]. Physical Review A, 1999, 61(1): 010303.
- [5] 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.
- [6] Li Ruixue, Ma Haiqiang, Wei Kejin, *et al.* Polarization-insensitive phase modulation in fiber quantum key distribution system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040601.  
李瑞雪, 马海强, 韦克金, 等. 光纤量子密钥分发系统中的偏振无关相位调制[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040601.
- [7] Cai X Q, Niu H F. Quantum private communication with an anonymous sender[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2013, 52(2): 411-419.
- [8] Liu W Q, Peng J Y, Wang C, *et al.* Hybrid quantum private communication with continuous-variable and discrete-variable signals[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58(2): 020301.
- [9] Baumeler A, Broadbent A. Quantum private information retrieval has linear communication complexity[J]. Journal of Cryptology, 2015, 28(1): 161-175.
- [10] Aleksic S, Winkler D, Poppe A, *et al.* Distribution of quantum keys in optically transparent networks: Perspectives, limitations and challenges[C]. 15<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks, 2013: 13779014.
- [11] Qi B, Zhu W, Qian L, *et al.* Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(10): 103042.
- [12] Peters N A, Toliver P, Chapuran T E, *et al.* Dense wavelength multiplexing of 1550 nm QKD with strong classical channels in reconfigurable networking environments[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(4): 045012.
- [13] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662-701.
- [14] Essiambre R, Mecozzi A. Capacity limits in single mode fiber and scaling for spatial multiplexing[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2012: OW3D.1.
- [15] Liu Lingling, Jing Mingyong, 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.
- [16] 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.
- [17] Nweke N I, Toliver P, Runser R J, *et al.* Experimental characterization of the separation between wavelength-multiplexed quantum and classical communication channels[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(17): 174103.
- [18] Chapuran T E, Toliver P, Peters N A, *et al.* Optical networking for quantum key distribution and quantum communications[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(10): 105001.
- [19] Choi I, Young R J, Townsend P D. Quantum information to the home[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(6): 063039.
- [20] Xia T J, Chen D Z, Wellbrock G, *et al.* In-band quantum key distribution (QKD) on fiber populated by high-speed classical data channels[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, 2006: OTuJ7.
- [21] Eraerds P, Walenta N, Legré M, *et al.* Quantum key distribution and 1 Gbps data encryption over a single fibre[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(6): 063027.
- [22] Patel K A, Dynes J F, Choi I, *et al.* Coexistence of high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber[J]. Physical Review X, 2012, 2(4): 041010.
- [23] 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.
- [24] Liu Youming, 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.
- [25] Kumar R, Qin H, Alléaume R. Coexistence of continuous variable QKD with intense DWDM classical channels[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(4): 043027.
- [26] Wang C, Huang D, Huang P, *et al.* 25 MHz clock continuous-variable quantum key distribution system over 50 km fiber channel[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(65): 33-40.
- [27] Huang D, Lin D, Wang C, *et al.* Continuous-variable quantum key distribution with 1 Mbps secure key rate[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17511-17519.
- [28] Liu Weiqi. 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.
- [29] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [30] Yaman F, Bai N, Zhu B, *et al.* Long distance transmission in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13250-13257.
- [31] Randel S, Ryf R, Gnauck A, *et al.* Mode-multiplexed  $6 \times 20$ -GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012: PDP5C.5.
- [32] Ip E, Bai N, Huang Y K, *et al.*  $88 \times 3 \times 112$ -Gb/s WDM transmission over 50-km of three-mode fiber with inline multimode fiber amplifier[C]. *37<sup>th</sup> European Conference and Exposition on Optical Communications*, 2011: Th.13.C.2.
- [33] Shah A R, Hsu R C J, Tarighat A, *et al.* Coherent optical mimo (COMIMO)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(8): 2410-2419.
- [34] Juarez A A, Bunge C A, Warm S, *et al.* Perspectives of principal mode transmission in mode-division-multiplex operation[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13810-13824.
- [35] Yao Shuchang, Fu Songnian, Zhang Minming, *et al.* Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 253-260.
- 姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 253-260.