

基于波分复用的空间量子-经典信号同传系统设计

朱宇¹, 石磊^{2*}, 魏家华², 朱秋立¹, 杨汝¹, 赵顾颢³

¹空军工程大学研究生院, 陕西 西安 710051;

²空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

³空军工程大学空管领航学院, 陕西 西安 710051

摘要 通过分析空间量子通信系统和经典光通信系统的误码率,设计了一种基于波分复用技术的空间量子-经典信号同传系统,并通过软件仿真分析其可行性。在 256 ns 内共传递 15 bit 量子密钥和 128 bit 经典信息,经典信息误码率为 4.07×10^{-15} ,结果表明该系统可以有效实现空间量子信号和经典信号的共信道同传,同时扩大空间量子密钥分发系统信道容量。

关键词 量子光学; 量子密钥分发; 脉冲位置调制; 波分复用; 自由空间光通信

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.082702

Coexistence System Design of Free Space Quantum-Classical Signal Based on Wavelength Division Multiplexing

Zhu Yu¹, Shi Lei^{2*}, Wei Jiahua², Zhu Qiuli¹, Yang Ru¹, Zhao Guhao³

¹Graduate College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China;

²Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

³Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China

Abstract The bit error rates (BERs) of both the free space quantum communication system and the classical optical communication system are analyzed. A free space quantum-classical signal coexistence transmission system is designed based on the wavelength division multiplexing technology, whose feasibility is investigated by the software simulation. The 15 bits quantum information and 128 bits classical information are totally transmitted within 256 ns and the BER of classical information is 4.07×10^{-15} . The results show that the designed system can effectively realize the coexistence transmission of free space quantum and classical signals in the same channel and simultaneously expand the channel capacity of the free space quantum key distribution system.

Key words quantum optics; quantum key distribution; pulse position modulation; wavelength division multiplexing; free space optical communication

OCIS codes 270.5565; 010.3310; 000.2170

1 引言

波分复用(WDM)技术在经典光通信领域非常成熟,大量应用于骨干光传输网络。2014年到2015年间,基于偏振复用和正交相移键控(QPSK)调制的100 G波分复用光传输技术开始大规模商用,中国一跃成为全球该技术最大应用市场^[1]。近三年

来,数据通信和互联网高速发展,网络流量呈十倍至百倍的爆炸式增长。面对电信运行商持续增长的压力,400 G/bit甚至1 T/bit骨干网络的构架被提上日程。2013年,中兴通信业内首次实现将400 Gb/s光信号在100 GHz通道间隔的WDM系统中传输超过5000 km,该系统的通信容量是目前最先进的商用光纤传输容量的两倍^[2]。同年,电气

收稿日期: 2018-09-21; 修回日期: 2018-10-17; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61601497)

* E-mail: slfly2012@163.com

与电子工程师协会 (IEEE) 于 4 月宣布组建新的 802.3 Standard for Ethernet 工作组, 探讨制定 400 Gb/s 带宽的新一代以太网传输标准^[3]。

量子保密通信是激光通信的一种, 将波分复用技术应用于量子密钥分发 (QKD) 不存在原理上的问题。2010 年, 由日本情报通信研究机构主导的量子通信研究机构在东京建成 6 节点城域量子通信网络——“Tokyo QKD Network”, 该网络能达到 GHz 级的 QKD 时钟同步, 实现了 45 km 距离下的世界首例安全视频会议通话^[4]。2015 年, 中国科技大学 Wang 等^[5]研究了量子密钥分发与经典光通信的波分复用, 采用多级带阻滤波技术实现了量子信道、同步信道和经典信道间足够高的隔离度, 将该方案应用到 QKD 与基于 F-P (Fabry-Perot) 激光光源双向通信的融合实验中, 传输距离达 45 km。

空间光通信研究晚于光纤通信, WDM 技术在空间中的发展并不完善。2013 年, 邓佳伟^[6]分析了空间波分复用关键技术和主要器件, 提出了一套基于 WDM 技术的空间激光发射系统设计方案, 通过仿真软件和室内实验验证了其可行性。2017 年, Liaw 等^[7]完成了 25 m 传输距离下 $2 \times 4 \times 10$ Gb/s 双向空间波分复用光通信, 并以此研究了斜入射光强、热致非均匀空气指数和降雨等环境因素对链路性能的影响。

WDM 技术多用于光纤通信, 空间波分复用技术研究较晚, 基于波分复用技术的空间量子保密通信尚属空白。本文提出一套基于波分复用技术的空间量子信号与经典光信号同传系统, 并通过软件仿真分析其可行性, 为今后量子通信向高速率、大容量骨干网络建设的发展提供参考。

2 量子-经典信号波分复用系统建模

使用 Optisystem 软件搭建了基于波分复用技术的空间量子密钥分发系统。主体结构如图 1 所示, 本系统选取 1540, 1550, 1560 nm 这三种波长作

为量子信号光, 与 850 nm 的经典信号进行复用, 左边是 4 个发射端, 右边是 4 个接收端, 中间使用 FSO (Free Space Optical) channel 模块模拟大气信道。

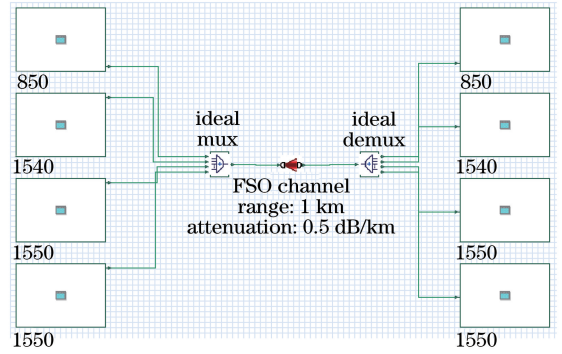


图 1 量子-经典信号波分复用结构图

Fig. 1 Structural diagram of quantum-classical signal coexistence system

经典信号发射端和接收端如图 2 和图 3 所示, 850 nm 经典信号光为连续光, 功率为 10 dBm, 重复频率为 500 MHz。由伪随机序列发生器 (PRBS) 产生的比特序列经脉冲位置调制 (PPM) 后, 通过外调制方式将电信号调制到激光上, 经复用后发射到大气信道, 图中 R_0 为初始比特率。信号在接收端解复用后由雪崩光电二极管 (APD) 检测, 并通过脉冲位置调制解调模块恢复成二进制序列。

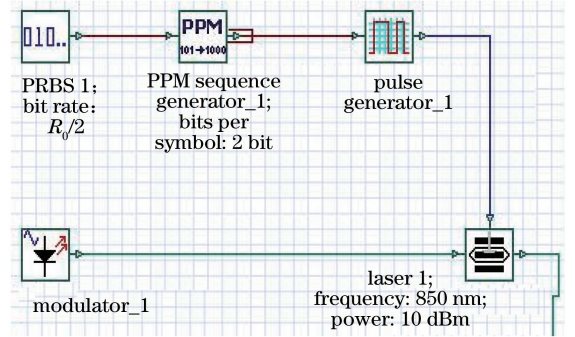


图 2 经典信号发射端结构图

Fig. 2 Structural diagram of transmitting terminal of classical signal

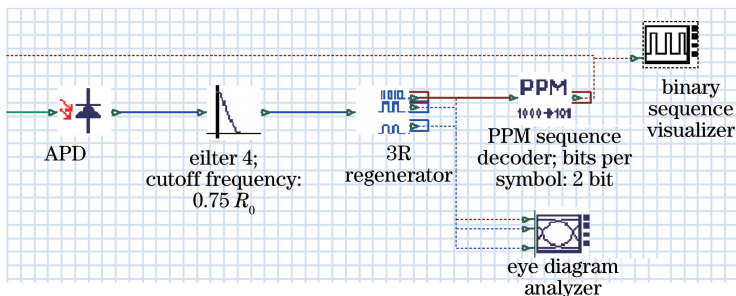


图 3 经典信号接收端结构图

Fig. 3 Structural diagram of receiving terminal of classical signal

量子密钥分发系统发射端和接收端如图 4 和图 5 所示,本系统采用 BB84 协议。以 1550 nm 波长的量子信号为例,使用高斯激光器产生重复频率为 100 MHz,脉宽为 0.1 ns 的脉冲。同时随机生成一组二进制序列,并以此确定每脉冲使用 H/V 基还是 +45/-45 基来进行偏振调制,整个调制过程由 Matlab 接入模块调用编写的程序来完成。之后信号经衰减器衰减成单光子级别,最后由波分复用器复用后传递到 FSO channel 模块,模块参数如

表 1 所示。根据掌握的实测数据,脉冲峰值功率为 10 mW,衰减 50 dB 后可达到单光子水平。接收端量子信号经解复用后先由干涉滤波器滤除杂波,之后由分束器、偏振分束器、半波片和 4 个单光子探测器组成的接收器进行探测。这里通过随机生成二进制序列来确定测量基的选择,并通过另一个 Matlab 接入模块调用程序模拟 BB84 协议中的密钥筛选过程。其他两种波长的量子信号产生与接收探测过程均与此相似。

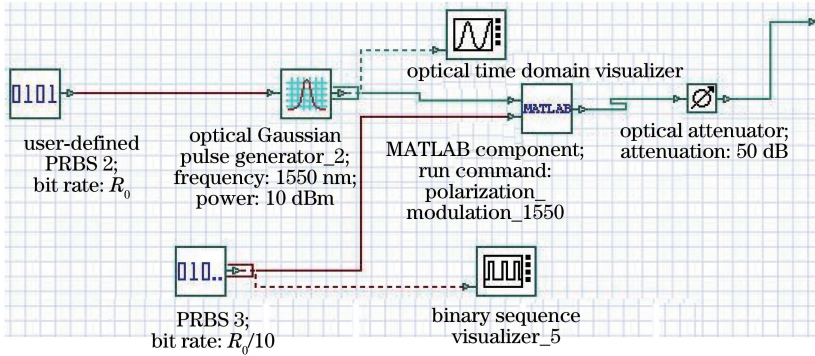


图 4 量子密钥分发系统发射端结构

Fig. 4 Structural diagram of transmitting terminal of QKD system

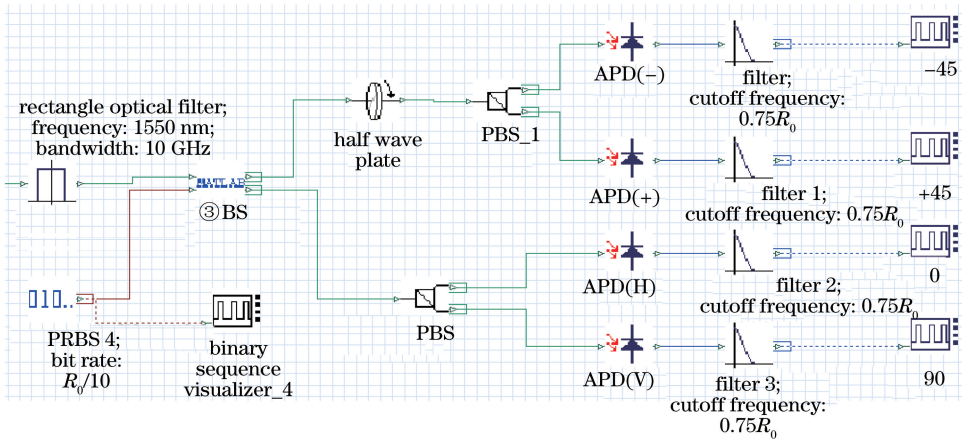


图 5 量子密钥分发系统接收端结构

Fig. 5 Structural diagram of receiving terminal of QKD system

表 1 大气信道模块参数

Table 1 Parameters of FSO channel model

Parameter	Value
Transmission distance /km	1
Channel attenuation / (dB·km ⁻¹)	5
Transmitter aperture diameter /cm	30
Receiving aperture diameter /cm	40
Beam divergence /mrad	0.03
Transmitter loss /dB	2
Receiver loss /dB	2
Scintillation model	Gamma-Gamma
Index refraction structure /m ^{-2/3}	1.7×10 ⁻¹⁴

3 系统误码率分析

3.1 量子安全密钥生成率

记大气总传输率为 η , 是大气透过率 η_{atm} 和探测器探测效率 η_d 的乘积^[8], 即

$$\eta = \eta_{atm} \eta_d, \quad (1)$$

式中 $\eta_{atm} = \exp(-\alpha L)$, α 为大气衰减系数, L 为传输距离。

记 QKD 系统中每个单光子探测器的暗计数概率为 k , 则光子到达其中一个探测器引起计数而其他探测器未响应的概率 R_1 为

$$R_1 = \eta(1-k)^3, \quad (2)$$

光子未到达探测器或探测器未检测到光子,但仍有一个探测器因暗计数而响应的概率 R_2 为

$$R_2 = (1-\eta)k(1-k)^3, \quad (3)$$

由此可推出接收端总计数率 R 为

$$R = R_1 + 4R_2 = \eta(1-k)^3 + 4(1-\eta)k(1-k)^3 = [\eta + 4(1-\eta)k](1-k)^3. \quad (4)$$

BB84 协议 QKD 系统中筛选后计数率 R_{sift} 为

$$R_{\text{sift}} = 0.5R = 0.5[\eta + 4(1-\eta)k](1-k)^3. \quad (5)$$

这里不考虑背景光噪声和光学元件等引起的误码,仅考虑暗计数引起的误码。由暗计数造成的筛选后误码的概率为 $1/2$,则量子误码率(QBER)可表示为

$$E = \frac{0.5 \times 4(1-\eta)k(1-k)^3 \times 0.5}{R_{\text{sift}}} = \frac{2(1-\eta)k}{\eta + 4(1-\eta)k}. \quad (6)$$

最终的安全密钥率为^[9]

$$R_{\text{net}} = R_{\text{sift}}(I_{\text{AB}} - I_{\text{AE}}), \quad (7)$$

式中: I_{AB} 为 Alice 和 Bob 之间的互信息, $I_{\text{AB}} = 1 - H_2(E)$, $H_2(E) = -E \ln(E) - (1-E) \ln(1-E)$; I_{AE} 表示 Alice 和 Eve 之间的互信息, $I_{\text{AE}} \approx H_2(E)$ 。于是最终安全密钥率为

$$R_{\text{net}} = R_{\text{sift}}[I_{\text{AB}} - I_{\text{AE}}] \approx R_{\text{sift}}[1 - 2H_2(E)] = 0.5[\eta + 4(1-\eta)k](1-k)^3 \times \left\{ 1 - 2H_2\left[\frac{2(1-\eta)k}{\eta + 4(1-\eta)k}\right] \right\}. \quad (8)$$

设定暗计数概率为 $k = 10^{-5}$,探测效率 $\eta_a = 0.9$,则在不同大气衰减系数下,安全密钥率与传输距离的关系如图 6 所示。

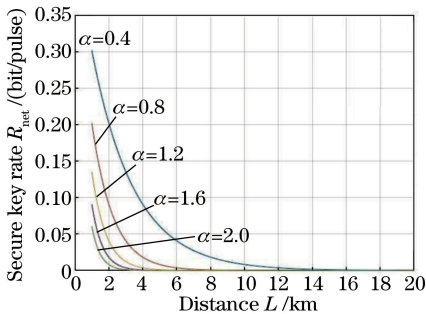


图 6 不同湍流强度下安全密钥率与距离的关系

Fig. 6 Security key rate versus distance under different turbulence intensities

3.2 经典信号误包率

脉冲位置调制技术是空间光通信中常用的技术,通常用误包率(PER)表示该调制方式下的经典光信号传输性能^[10],表达式为

$$R_{\text{PER}} = 1 - (1 - R_{\text{SER}})^{\frac{L_P}{M}}, \quad (9)$$

式中: L_P 为数据包长度; $M = 2^N$ 为每 PPM 信号周期内包含的时隙数, N 为每 PPM 脉冲包含的比特位数; R_{SER} 为误符号率^[11],表达式为

$$R_{\text{SER}} \approx \frac{2^M - 1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{2(\sigma_0^2 + \sigma_1^2)}} \right], \quad (10)$$

式中: $\operatorname{erfc}(x)$ 为互补误差函数, $\operatorname{erfc}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_x^\infty \exp(-y^2) dy$; μ_0, σ_0^2 分别表示探测器空时隙输出电流的均值和方差; μ_1, σ_1^2 分别表示脉冲时隙输出电流的均值和方差,其表达式为^[12]

$$\begin{cases} \mu_0 = G \cdot e \cdot K_b \\ \sigma_0^2 = (G \cdot e) 2 \cdot F \cdot K_b + \sigma_n^2 \\ \mu_1 = G \cdot e \cdot [K_s(I) + K_b] \\ \sigma_1^2 = (G \cdot e) 2 \cdot F \cdot [K_s(I) + K_b] + \sigma_n^2 \end{cases}, \quad (11)$$

式中: G 为光电倍增管增益因子; e 为元电荷; F 为加性噪声因子; σ_n^2 为热噪声; K_b 为背景噪声光子计数率; $K_s(I)$ 对应于接收脉冲强度为 I 的光子计数率。

$$\begin{cases} K_s(I) = \eta' I T_b / (h\nu) \\ K_b = \eta' I_b T_b / (h\nu) \\ \sigma_n^2 = 2k_c T T_b / (R_L) \end{cases}, \quad (12)$$

式中: η' 为量子效率; T_b 为每时隙持续时间; h 为普朗克常量; ν 为信号光频率; k_c 为玻尔兹曼常数; T 为温度; R_L 为负载电阻。

不考虑湍流影响时,PPM 信号误包率随接收信号光强变化情况如图 7 和图 8 所示,可以看出,相同接收信号光强下,PPM 信号阶数越小,每段数据码长越短,误包率越小。

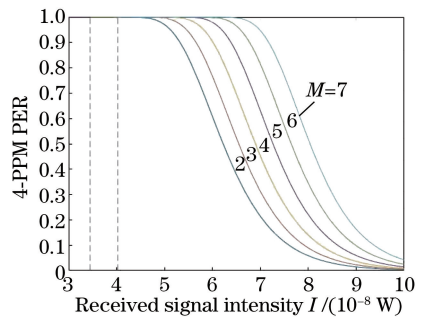


图 7 不同时隙数下 4-PPM 信号误包率

Fig. 7 R_{PER} of 4-PPM signal under different slots

4 仿真结果分析

以 1550 nm 波长的量子信号为例,如图 9 所示,在 256 ns 内共生成 26 个脉冲,之后根据 BB84 协议随机选择 H/V 基或 $+/-$ 基调制所有脉冲信号,如表 2 所示。复用后的三路量子信号被传输至 FSO channel 模块模拟的大气信道。

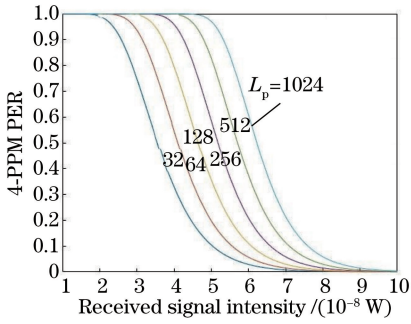


图 8 不同 L_p 下 4-PPM 信号误包率

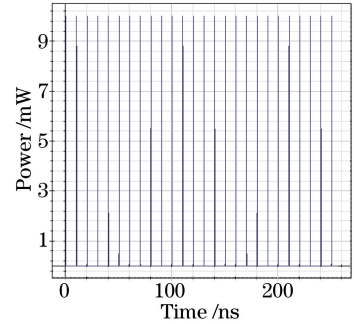


图 9 26 个量子信号脉冲

Fig. 8 R_{PER} of 4-PPM signal under different L_p

Fig. 9 26 quantum signal pulses

表 2 1550 nm 量子密钥信息

Table 2 1550 nm quantum key information

Quantum key information	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
Polarization state	45	-45	0	45	45	90	45	-45	45	45	-45	45	-45
	0	90	45	45	-45	90	-45	0	-45	-45	90	0	90

以 1550 nm 波长为例,4 个探测器输出电脉冲如图 10 所示。将这 4 个脉冲波形整合到一幅图上,通

过观察幅值最大脉冲,即可判断信号光子到达哪个探测器。4 个探测器输出电脉冲波形对比图如图 11 所

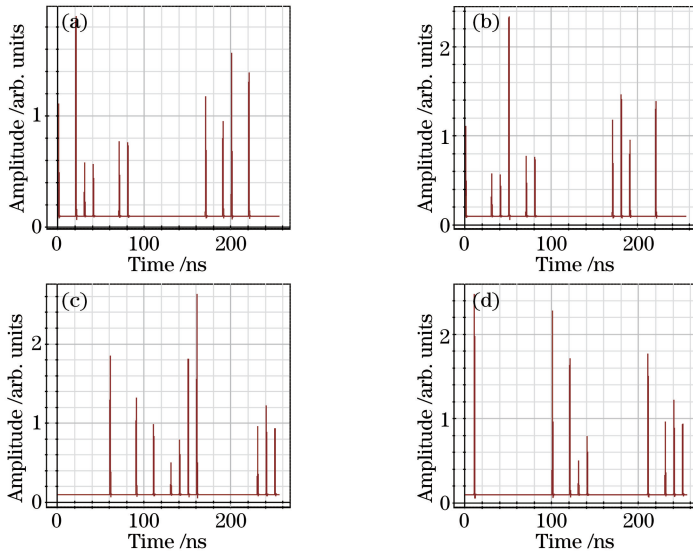


图 10 不同偏振态下,1550 nm QKD 系统探测器输出电脉冲。(a) 0 偏振态;(b) 90 偏振态;(c) +45 偏振态;(d) -45 偏振态
Fig. 10 APD output electric pulses of 1550 nm QKD system. (a) Polarization state of 0; (b) polarization state of 90; (c) polarization state of +45; (d) polarization state of -45

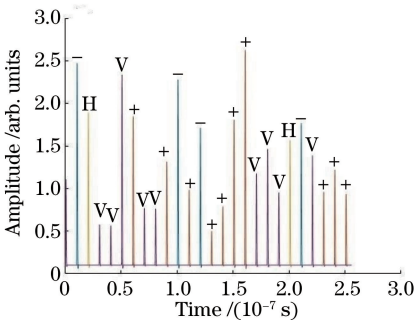


图 11 4 个探测器输出电脉冲对比图

Fig. 11 Comparison of electric pulses from four APDs

示,通过观察峰值最大的脉冲即可知道该时刻到达的量子信号的偏振态。图 12 给出整个量子密钥传输过程,包括偏振态制备、测量基选择和密钥筛选。深色部分数据表示正确传输了密钥,可以看到 26 组密钥中有 15 组密钥在接收端测量时选择了与制备时相同的基矢,得到了完全相同的偏振信息,形成了原始密钥(raw key)。

经典信号传输采用空间光通信中常用的脉冲位置调制方式,仿真时间内共传递 128 bits 信息。发射端二进制信息与接收后恢复出的二进制信息如

Alice	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	45	-45	0	45	45	90	45	-45	45	45	-45	45	-45
measurement base	H/V	+/-	H/V	H/V	H/V	H/V	+/-	H/V	H/V	+/-	+/-	+/-	+/-
Bob	V	-	H	V	V	V	+	V	V	+	-	+	-
raw key		1	0			1	1			0	0	0	1
Alice	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1
	0	90	45	-45	-45	90	-45	0	-45	-45	90	0	90
measurement base	+/-	+/-	+/-	+/-	H/V	H/V	H/V	H/V	+/-	H/V	+/-	+/-	+/-
Bob	+	+	+	+	V	V	V	H	-	V	+	+	+
raw key	0		0	0		1		0	1			0	

图 12 量子密钥传输过程

Fig. 12 Quantum key transmission process

图 13 所示,二者更直观的对比如图 14 所示,可以看出,经典信号探测器能恢复出与发射端完全相同的信息。通过眼图分析仪得到该系统眼图如图 15 所示,可以看出,眼图张开较大且较为端正,说明经典信号码间串扰较小,同时眼图下迹线工整但上述

线杂乱,说明大气信道中的闪烁效应造成的噪声对信号影响较大。另外还通过该分析仪测得 BER 约为 4.07×10^{-15} , Q 因子为 7.6。整体来看该复用系统能有效传递经典信号且最终误码较低。

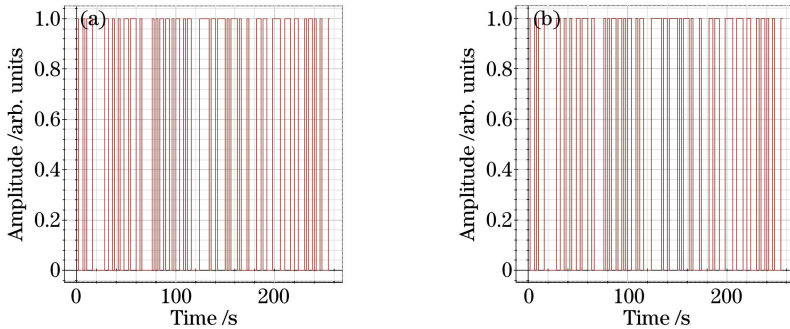


图 13 经典信号发射端与接收端二进制序列。(a)发射端;(b)接收端

Fig. 13 Binary sequences of classical signal in transmitter and receiver. (a) Transmitter; (b) receiver

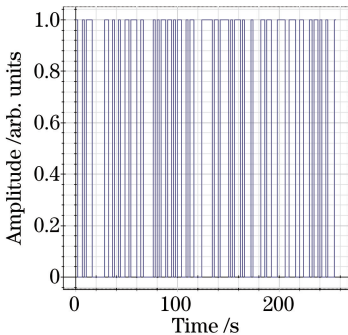


图 14 发射端和接收端经典信息对比图

Fig. 14 Comparison of classical information in transmitter and receiver

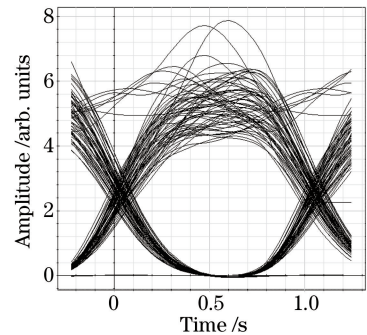


图 15 经典信号眼图

Fig. 15 Eye diagram of classical signal

5 结 论

波分复用技术在光纤量子通信骨干网络的构建

中应用广泛,已被证明是一种高效的扩大信道容量的手段,然而在空间量子通信中的应用还亟待研究。本研究设计了一种基于波分复用技术的空间量子-经典信号同传系统,通过仿真软件分析可行性,从结

果来看,量子信号和经典信号均能通过该系统进行有效传输。在仿真实验的基础上,下一步工作需要实际实验上的验证,研究更复杂的环境因素,如不同大气能见度、不同湍流强度和较强背景光等,对该系统的影响。

参 考 文 献

- [1] Zeng Q Z, Gao G X. Research about 400 G optical transmission technologies [J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(4): 92-96.
曾庆珠, 高桂香. 400 G 光传输技术研究[J]. 微波学报, 2016, 32(4): 92-96.
- [2] Yu J, Zhang J, Dong Z, *et al.* Transmission of 8×480 -Gb/s super-Nyquist-filtering 9-QAM-like signal at 100 GHz-grid over 5000-km SMF-28 and twenty-five 100 GHz-grid ROADMs[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15686-15691.
- [3] Trowbridge S J. Ethernet and OTN-400 G and beyond[C] // 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, USA. New York: IEEE, 2015: 1-18.
- [4] Sasaki M, Fujiwara M, Ishizuka H, *et al.* Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10387-10409.
- [5] Wang L J, Chen L K, Ju L, *et al.* Experimental multiplexing of quantum key distribution with classical optical communication[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(8): 081108.
- [6] Deng J W. The emit technique of space optical communication based on WDM [D]. Changchun University of Science and Technology, 2013.
邓佳伟. 基于波分复用的空间光通信发射技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [7] Liaw S K, Hsu K Y, Yeh J G, *et al.* Impacts of environmental factors to bi-directional 2×40 Gb/s WDM free-space optical communication[J]. Optics Communications, 2017, 396: 127-133.
- [8] Wang X Y, Zhao N, Chen N, *et al.* Effects of atmospheric turbulence on the single-photon receiving efficiency and the performance of quantum channel with the modified approximate elliptic-beam model assumption[J]. Quantum Information Processing, 2018, 17: 14.
- [9] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, *et al.* Quantum cryptography[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 145.
- [10] Ma J, Jiang Y J, Yu S Y, *et al.* Packet error rate analysis of OOK, DPIM and PPM modulation schemes for ground-to-satellite optical communications[J]. Optics Communications, 2010, 283(2): 237-242.
- [11] Srinivasan M, Vilmrotter V. Symbol-error probabilities for pulse-position modulation signaling with an avalanche photodiode receiver and Gaussian thermal noise [R]. The Telecommunications and Mission Operations Progress Report 42-134, [S. l. : s. n.]. 1998: 1-11.
- [12] Gagliardi R M, Karp S. Optical telecommunications and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.