

航空平台连续变量量子通信系统的信道特性

杨汝**, 李云霞*, 蒙文, 朱秋立, 朱宇, 黄超, 赵顾颢

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 在考虑大气湍流及气动光学效应的情况下,建立了航空平台连续变量量子通信系统的传播模型,数值分析了信道特性对系统安全密钥率的影响。结果表明,大气湍流的折射率结构常数越小,气动光学影响下折射率结构常数的变化对系统安全密钥率的影响越明显;大气湍流及气动光学效应对系统安全密钥率的影响不容忽视。根据大气信道特性,通过设计相应的系统补偿模块,自适应地调整量子通信系统的相关参数,可以增强系统的稳健性。

关键词 量子光学; 航空平台; 量子通信; 连续变量; 大气湍流; 气动光学效应; 安全密钥率

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0927002

Channel Characteristics of Continuous Variable Quantum Communication System on Aviation Platform

Yang Ru**, Li Yunxia*, Meng Wen, Zhu Qiuli, Zhu Yu, Huang Chao, Zhao Guhao

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

Abstract The propagation model of a continuous variable quantum communication system on an airborne platform is established in the case that the atmospheric turbulence and aero-optical effects are considered. The influence of channel characteristic on the security key rate of this system is numerically analyzed. The results show that, the smaller the refractive index structure constant of the atmospheric turbulence is, the more obvious the influence of the change of the refractive index structure constant on the security key rate of this system is. The influence of the atmospheric turbulence and the aero-optical effect on the security key rate of the system cannot be ignored. According to the atmospheric channel characteristics, the corresponding compensation module for this system is designed to adaptively adjust the relevant parameters of the quantum communication system so as to enhance the robustness of the system.

Key words quantum optics; aviation platform; quantum communications; continuous variable; atmospheric turbulence; aero-optics effect; security key rate

OCIS codes 270.5565; 270.5568; 270.1670; 010.1330

1 引 言

以量子力学为基础的量子通信因其理论上的无条件安全性,成为目前保密通信领域的研究热点之一。自由空间量子保密通信是构建全球量子保密通信的关键技术之一。自由空间量子通信的信号光在大气信道中传输时会受大气湍流的影响,产生相位波动、光强闪烁、光斑扩展、光束漂移等现象,增大了量子通信系统的误码率。马小平等^[1]分析了相干探测技术在解调相位信息时克服大气湍流效应方面的优势。Zhang 等^[2]从广义惠更斯-菲涅耳原理出发,

分析了基于高斯光束的单光子在大气湍流中传播的捕获概率分布及光束扩展规律。聂敏等^[3]通过近地面大气湍流的 Tunick 模型,分析了大气湍流对量子信道利用率的影响。李铁等^[4]研究了大气湍流对光子轨道角动量纠缠特性的影响。由于编码载体的不同,自由空间量子保密通信可分为离散变量量子保密通信和连续变量量子保密通信。离散变量量子密钥分发技术的研究起步较早,技术发展较为成熟。2016 年,“墨子号”量子科学实验卫星在酒泉卫星发射中心成功发射,其轨道高度为 500 km;“墨子号”卫星所进行的量子科学实验为星地量子通信和全球

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61601497)

* E-mail: yunxial@sohu.com; ** E-mail: 1443364980@qq.com

量子通信网络铺平了道路^[5],但背景光的干扰严重影响了系统的全天时通信性能。Liao 等^[6]通过频率上转换单光子探测技术及自由空间光束单模光纤耦合技术,成功实现了白天远距离的自由空间离散变量量子密钥分发。虽然该实验解决了白天的背景光干扰问题,但是增加了系统的复杂度。连续变量量子密钥分发技术的研究虽然起步较晚,但是其信号光制备简单,密钥分发速率高,测量方便,通信容量高,成为自由空间量子保密通信领域新的研究热点之一。

航空平台量子通信系统具有安全性高、机动灵活、信号传输损耗和时延小等优点,在军事保密通信和应急通信领域有重要的战略价值,成为目前研究的热点之一。Nauerth 等^[7-8]将 BB84 系统整合进机载平台,通过对量子信道中的偏振旋转进行精确补偿,成功实现了飞机与光学地面站之间的量子密钥分发实验,该实验的通信距离为 20 km,密钥率为 145 bit/s。Wang 等^[9]成功实现了基于热气球的浮空运动平台的诱骗态量子密钥分发实验,通信距离为 20 km。Bourgoin 等^[10]解决了主动纠正光束指向、光子偏振旋转的问题,在运动卡车上进行了量子密钥分发实验,该实验的安全密钥率为 40 bit/s。Pugh 等^[11]进行了飞机与光学地面站之间的量子密钥分发实验,该实验采用量子上行链路,接收端在飞机上,量子源在地面站。飞机的飞行高度为 1.6 km,飞行路线分别为半径为 7 km 的圆弧和距离为 3, 5, 7, 10 km 的直线,实验误码率范围为 2.66%~5.08%。

本文基于航空平台连续变量量子通信系统的理论模型,对其安全密钥率进行了数学推导,仿真分析了实际传输链路中大气湍流及气动光学效应对安全密钥率的影响。

2 航空平台连续变量量子通信的理论模型

航空平台连续变量量子通信系统的示意图如图 1 所示,该系统在航空平台量子平台(Alice)与光学地面站之间(Bob)采用 GG02 协议^[12-13]进行连续变量量子密钥分发。反向协商比正向协商传输距离更远、性能更好^[14-15],故采用反向协商的方式进行连续变量量子密钥分发。从量子安全密钥率的数学模型出发,研究航空平台连续变量量子通信系统的信道特性。

在单独攻击下,航空量子平台与光学地面站之间可获得的安全密钥率^[16]为

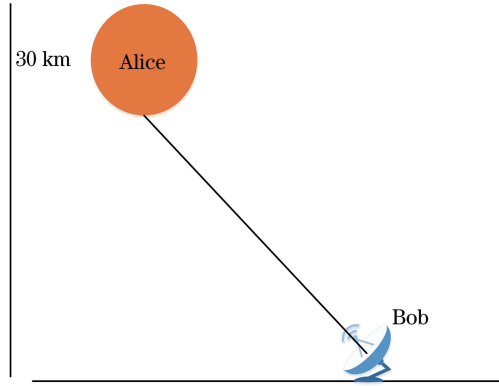


图 1 航空平台量子密钥分发示意图

Fig. 1 Schematic of quantum key distribution on airborne platform

$$K = \beta I_{AB} - I_{BE}, \quad (1)$$

式中 β 为反向协商效率, I_{AB} 为航空量子平台与光学地面站之间的互信息量, I_{BE} 为窃听方能够从光学地面站窃听到的最大信息量。

Bob 使用零差检测时^[16],有

$$I_{AB} = \frac{1}{2} \text{lb} \frac{V + \chi_{\text{tot}}}{1 + \chi_{\text{tot}}}, \quad (2)$$

$$I_{BE} = \frac{1}{2} \text{lb} \frac{T^2 (V + \chi_{\text{tot}}) (1/V + \chi_{\text{line}})}{1 + T\chi_{\text{hom}} (1/V + \chi_{\text{line}})}, \quad (3)$$

式中 V_B 为 Bob 端的高斯调制方差, V 为表征系统高斯调制方差的参数, χ_{tot} 为系统噪声总量, χ_{line} 为信道引入的噪声, χ_{hom} 为检测器引入的噪声, T 为信道透过率。各参数关系^[16]为

$$V = V_A + 1, \quad (4)$$

$$\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{line}} + \frac{\chi_{\text{hom}}}{T}, \quad (5)$$

$$\chi_{\text{line}} = \frac{1}{T} + \epsilon - 1, \quad (6)$$

$$\chi_{\text{hom}} = \frac{1 + V_{\text{el}}}{\eta} - 1, \quad (7)$$

式中 V_A 为 Alice 端的高斯调制方差, ϵ 为信道过噪声, V_{el} 为检测器过噪声, η 为检测器效率。

信道透过率 T ^[17]为

$$T = \exp(-\alpha L), \quad (8)$$

式中 α 为大气衰减因子, L 为通信距离。

在单独攻击的情况下,零差检测时,航空量子平台与光学地面站之间的安全密钥率 k 与信道透过率 T 、信道过噪声 ϵ 、Alice 端的高斯调制方差 V_A 、检测器过噪声 V_{el} 、检测器效率 η 、反向协商效率 β 有关。

信道透过率 T 与通信距离 L 、大气衰减因子 α 有关。信道过噪声 ϵ ^[18-19] 与环境噪声有关。在 $V_A =$

18.9, $V_{el}=0.0436$, $\eta=0.526$, $\beta=0.94$, $\alpha=0.2$ 的条件下,对安全密钥率、通信距离、信道过噪声之间的关系进行了仿真,结果如图 2 所示。

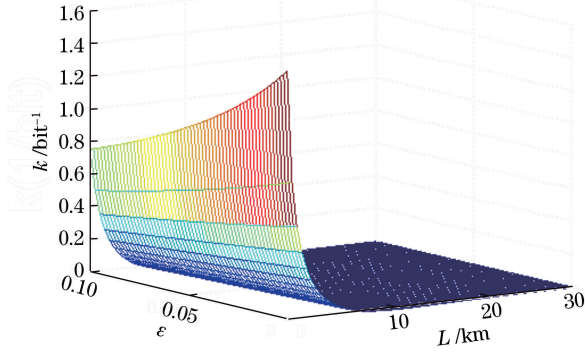


图 2 安全密钥率与通信距离、信道过噪声之间的关系
Fig. 2 Relationship among security key rate, communication distance and channel excess noise

由图 2 可知,随着通信距离的增大,大气对信号光的衰减作用增强,系统的安全密钥率减小;信道过噪声与环境噪声有关,随着信道过噪声的增大,通信过程中引入的环境噪声增大,系统信噪比减小,系统的安全密钥率减小。

在 $V_A=18.9$, $V_{el}=0.0436$, $\eta=0.526$, $\beta=0.94$, $\epsilon=0.02$ 的条件下,对安全密钥率 k 、大气衰减因子 α 、通信距离 L 之间的关系进行了仿真,结果如图 3 所示。

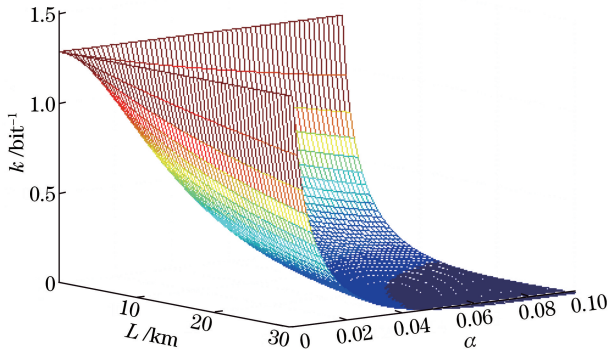


图 3 安全密钥率与大气衰减因子、通信距离之间的关系
Fig. 3 Relationship among security key rate, atmospheric attenuation factor and communication distance

由图 3 可知,随着大气衰减因子的增大,大气对信号光的衰减作用增强,系统的安全密钥率减小;在通信距离较小的情况下,大气衰减因子的变化对系统安全密钥率的影响较明显。

3 大气湍流和气动光学效应对安全密钥率的影响

将信道引入的噪声等效到输入端,即信道过噪

声 ϵ ^[17] 表示为

$$\epsilon = \frac{V_B - 1 - V_{el} - \rho^2 V_B}{\eta T}, \quad (9)$$

式中 ρ 为 Alice 和 Bob 得到的高斯随机数之间的相关系数。 V_A 与 V_B 间的关系^[17] 为

$$V_A = \frac{V_B - 1 - V_{el}}{\eta}. \quad (10)$$

接收端的信噪比^[17] 为

$$f_{SNR} = \frac{V_A}{1 + \chi_{tot}} = \frac{\rho^2}{1 - \rho^2}. \quad (11)$$

由(9)~(11)式可得信道过噪声与信噪比之间的关系为

$$\epsilon = \frac{V_A}{T} - \frac{f_{SNR}(\eta V_A + 1 + V_{el})}{(1 + f_{SNR})\eta T}. \quad (12)$$

考虑大气湍流和气动光学效应,根据平均信噪比的定义,航空激光通信链路的平均信噪比^[20] 可表示为

$$\langle f_{SNR} \rangle = \frac{f_{SNR0}}{\sqrt{\left(\frac{P_{s0}}{\langle P_s \rangle}\right) + \sigma_1^2(0, L; D) f_{SNR0}^2}} = \frac{f_{SNR0}}{\sqrt{\frac{1}{1 + 1.33\sigma_R^2 \Lambda^{5/6} + 1.93\sigma_{R,aero}^2 \Lambda^{5/6}} + \sigma_1^2(0, L; D) f_{SNR0}^2}}}, \quad (13)$$

式中 f_{SNR0} 为不考虑大气湍流和气动光学效应时航空激光通信链路的信噪比; P_{s0} 为不考虑大气湍流效应的信号功率; P_s 为探测器的瞬时输入信号功率; Λ 为接收端的衍射光束参数; σ_R^2 为大气湍流影响下的 Rytov 指数, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k'^{7/6} L^{11/6}$, 其中 C_n^2 为大气湍流的折射率结构常数, k' 为激光波数; $\sigma_{R,aero}^2$ 为考虑气动光学影响的 Rytov 指数, $\sigma_{R,aero}^2 = 1.23C_{n,aero}^2 k'^{7/6} L^{11/6}$; $C_{n,aero}^2$ 为气动光学影响下的折射率结构常数; $\sigma_1^2(0, L; D)$ 为闪烁指数,其中 D 为接收端孔径。

航空平台量子通信系统的信号光在大气信道中传输时会受大气湍流和气动光学效应的影响,主要表现为光强闪烁现象^[21-22]。考虑大气湍流和气动光学效应的影响,当接收端孔径 D 固定时,闪烁指数^[23] 表示为

$$\sigma_1^2(0, L; D) = \exp[\sigma_{lnx}^2(D) + \sigma_{lny}^2(D)] - 1, \quad \Omega > \Lambda, \quad (14)$$

式中 Ω 为描述接收端孔径的无量纲参数, $\Omega = \frac{16L}{kD^2}$; $\sigma_{lnx}^2(D)$ 、 $\sigma_{lny}^2(D)$ 分别为大尺度及小尺度对数方差^[23], 可表示为

$$\sigma_{\ln X}^2(D) = \frac{0.49 \left(\frac{\Omega - \Lambda}{\Omega + \Lambda} \right)^2 \sigma_B^2}{\left[1 + \frac{0.4(2 - \bar{\Theta}) (\sigma_B/\sigma_R)^{12/7}}{(\Omega + \Lambda) \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\bar{\Theta} + \frac{1}{5}\bar{\Theta}^2 \right)^{6/7}} + 0.56(1 + \bar{\Theta})\sigma_B^{12/5} \right]^{7/6}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2(D) = \frac{\frac{0.51\sigma_B^2}{(1 + 0.69\sigma_B^{12/5})^{5/6}}}{1 + \frac{1.20 (\sigma_R/\sigma_B)^{12/5} + 0.83\sigma_B^{12/5}}{\Omega + \Lambda}}, \quad (16)$$

式中 Θ 为接收端的衍射光束参数, $\bar{\Theta}$ 为接收端的衍射光束参数的平均值; 当接收端孔径取任意值, 且仅考虑大气湍流影响下的闪烁指数时, σ_B^2 具体表示为

$$\sigma_B^2 = \sigma_{\text{aero}}^2(L) + 3.86\sigma_R^2 \text{Re} \left[i^{5/6} {}_2F_1 \left(-\frac{5}{6}, \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; 1 - \Theta + i\Lambda \right) \right] - 2.64\sigma_R^2 \Lambda^{5/6}, \quad (17)$$

式中 Re 代表求实部, ${}_2F_1(\cdot)$ 为广义超几何函数, $\sigma_{\text{aero}}^2(L)$ 为受气动光学效应影响的闪烁指数增项, 其具体表达式^[24]为

$$\sigma_{\text{aero}}^2(L) = 3.87\sigma_{R,\text{aero}}^2 \left\{ (\Theta^2 + \Lambda^2)^{5/12} \cos \left[\frac{5}{6} \tan^{-1} \left(\frac{\Theta}{\Lambda} \right) \right] - \Lambda^{5/6} \right\}. \quad (18)$$

在 $W_0 = 0.01 \text{ m}$, $F_0 = 0.01 \text{ m}$, $D = 0.2 \text{ m}$, $L = 3 \times 10^4 \text{ m}$, $\lambda = 1.55 \times 10^{-9} \text{ m}$, $f_{\text{SNR}0} = 25 \text{ dB}$ (W_0 为发射端光束半径, F_0 为发射端相前曲率半径, λ 为波长) 的条件下, 对信噪比与大气湍流折射率结构常数、气动光学影响下的折射率结构常数之间的关系进行了仿真, 结果如图 4 所示。

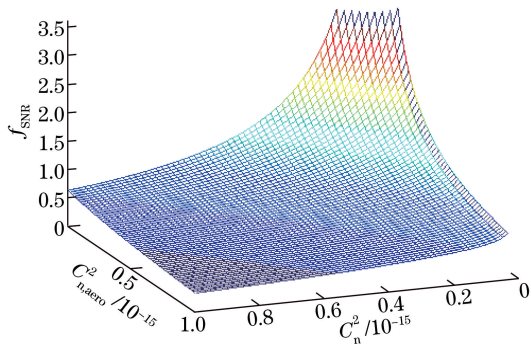


图 4 信噪比与大气湍流折射率结构常数、气动光学影响下的折射率结构常数之间的关系

Fig. 4 Relationship among signal-to-noise ratio, atmospheric turbulence refractive index structure constant and aero-optical-influenced refractive index structure constant

由图 4 可知, 随着大气湍流折射率结构常数的增大, 大气湍流强度增大, 对信号光的衰减作用增强, 系统的信噪比减小; 随着气动光学影响下的折射率结构常数的增大, 气动光学效应对信号光的衰减作用增强, 系统的信噪比减小; 在大气湍流折射率结构常数较小的情况下, 气动光学影响下的折射率结构常数的变化对系统信噪比的影响较明显。

在 $V_A = 18.9$, $V_{el} = 0.0436$, $\eta = 0.526$, $\beta = 0.89$, $\alpha = 0.002$, $W_0 = 0.01 \text{ m}$, $F_0 = 0.01 \text{ m}$, $D = 0.2 \text{ m}$, $L = 3 \times 10^4 \text{ m}$, $\lambda = 1.55 \times 10^{-9} \text{ m}$, $f_{\text{SNR}0} = 25 \text{ dB}$ 的条件下, 对安全密钥率 k 与大气湍流折射率结构常数 C_n^2 、气动光学影响下的折射率结构常数 $C_{n,\text{aero}}^2$ 之间的关系进行了仿真, 结果如图 5 所示。

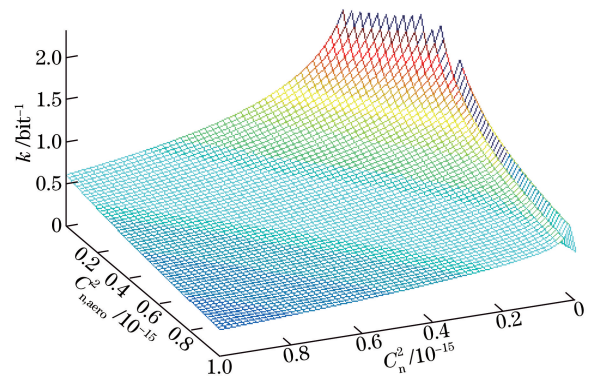


图 5 安全密钥率与大气湍流折射率结构常数、气动光学影响下的折射率结构常数之间的关系

Fig. 5 Relationship among security key rate, atmospheric turbulence refractive index structure constant and aero-optical-influenced refractive index structure constant

由图 5 可知, 随着大气湍流折射率结构常数的增大, 大气湍流强度增大, 对信号光的衰减作用增强, 系统的安全密钥率减小; 随着气动光学影响下的折射率结构常数的增大, 气动光学效应对信号光的衰减作用增强, 系统的安全密钥率减小; 在大气湍流折射率结构常数较小的情况下, 气动光学影响下的

折射率结构常数的变化对系统安全密钥率的影响较明显。

4 结 论

分析了大气湍流及气动光学效应对航空平台连续变量量子密钥分发的影响,基于航空平台连续变量量子通信系统理论模型,对其安全密钥率进行了数学推导,得到了在单独攻击的情况下,零差检测时的安全密钥率与通信距离、信道过噪声、大气衰减因子之间的关系。通过数学仿真,分析了实际传输链路中的大气湍流及气动光学效应对系统信噪比、安全密钥率的影响。结果表明,受大气湍流强度及气动光学效应的影响,量子通信中各项通信性能指标都发生了改变,系统的信噪比、安全密钥率的变化尤为明显。因此,在航空平台连续变量量子通信系统中,大气湍流及气动光学效应的信道特性不容忽视,需要通过设计各种补偿模块自适应地调整系统的参数,以降低大气湍流及气动光学效应对系统的安全密钥率的影响。量化分析了大气湍流及气动光学效应对航空平台连续变量量子通信系统安全密钥率的影响,为自由空间连续变量量子通信的航空工程应用提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Ma X P, Sun J F, Hou P P, *et al.* Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 120002.
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 120002.
- [2] Zhang G Y, Liu L J, Zhang C L. Study on single-photon acquisition probability based on Laguerre-Gaussian beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0101001.
张光宇, 刘琳婧, 张成龙. 基于拉盖尔-高斯的单光子捕获概率研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0101001.
- [3] Nie M, Gao K, Yang G, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on the performance of free space quantum communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0701001.
聂敏, 高锴, 杨光, 等. 近地面大气湍流对自由空间量子通信性能的影响[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0701001.
- [4] Li T, Chen J, Ke X Z, *et al.* Study of orbital angular momentum entangled photons entanglement in atmospheric channel[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 124208.
李铁, 谌娟, 柯熙政, 等. 大气信道中单光子轨道角动量纠缠特性的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 124208.
- [5] Gibney E. Chinese satellite is one giant step for the quantum internet[J]. *Nature*, 2016, 535 (7613): 478-479.
- [6] Liao S K, Yong H L, Liu C, *et al.* Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 509-513.
- [7] Nauerth S, Moll F, Rau M, *et al.* Air to ground quantum key distribution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8518: 85180D.
- [8] Nauerth S, Moll F, Rau M, *et al.* Air-to-ground quantum communication[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 382-386.
- [9] Wang J Y, Yang B, Liao S K, *et al.* Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 387-393.
- [10] Bourgoin J P, Higgins B L, Gigov N, *et al.* Free-space quantum key distribution to a moving receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33437-33447.
- [11] Pugh C J, Kaiser S, Bourgoin J P, *et al.* Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload[J]. *Quantum Science and Technology*, 2017, 2(2): 024009.
- [12] Li Y M, Wang X Y, Bai Z L, *et al.* Continuous variable quantum key distribution[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(4): 040303.
- [13] Jouguet P, Kunz-Jacques S, Leverrier A, *et al.* Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 378-381.
- [14] Grosshans F, Cerf N J, Wenger J, *et al.* Virtual entanglement and reconciliation protocols for quantum cryptography with continuous variables[J]. *Quantum Information & Computation*, 2003, 3(7): 535-552.
- [15] Dou L, Guo D B, Wang X K. Algorithm optimization of multidimensional reconciliation for continuous-variable quantum key distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0927001.
窦磊, 郭大波, 王晓凯. 连续变量量子密钥分发多维数据协调算法优化[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0927001.
- [16] Shen Z Y. The key technology research in continuous variable quantum key distribution system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

- 申泽源. 连续变量量子密钥分发系统中关键技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [17] Lodewyck J, Debuisschert T, Tualle-Brouiri R, *et al.* Quantum key distribution with coherent states at telecom wavelength[C]. European Quantum Electronics Conference, 2005: 301.
- [18] Günthner K, Khan I, Elser D, *et al.* Quantum-limited measurements of optical signals from a geostationary satellite[J]. Optica, 2017, 4(6): 611-616.
- [19] Huang D, Huang P, Lin D K, *et al.* Long-distance continuous-variable quantum key distribution by controlling excess noise[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19201.
- [20] Han L Q, Wang Q, Katsunori S. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmosphere turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1318-1322.
- [21] Ke X Z, Zhang Y. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106001.
- 柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106001.
- [22] Wang R. Simulation experiment of using multiple partially coherent beams to limit laser intensity scintillation effect[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(7): 835-839.
- [23] Felton B D, Hayes P D, Alliss R J. Improved atmospheric characterization for free-space link analysis using numerical weather prediction[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8380: 83800C.
- [24] Jiang H L, Liu Z G, Tong S F, *et al.* Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 567-570.
- 姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 567-570.