

doi: 10.3788/gzxb20154412.1227003

自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响

任杰¹, 聂敏¹, 杨光^{1,2}, 裴昌幸³

(1 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

(2 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072)

(3 西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

摘 要:根据大气中尺寸与光波长相近的各粒子的粒度谱分布函数,分析了大气湿度、粒子浓度、光信号波长和粒子直径等因子与量子弱相干光信号的衰减关系.讨论了多环境因子对大气能见度的影响,得到平流层量子通信中大气能见度和探测望远镜倾角对链路衰减的影响,量子信号传输误码率、保真度与大气能见度和传输距离的定量关系.仿真实验表明,随着大气湿度和粒子浓度的增加,量子信号传输的链路衰减逐渐增加,当光信号波长与粒子直径相近时,衰减最显著;在传输距离为 15 km,望远镜倾角为 90°的前提下,当大气能见度分别为 5 km 和 15 km 时,链路衰减依次为 18.9 dB 和 14.2 dB,信道误码率分别为 0.010 5 和 0.009 9,信号保真度分别为 0.22 和 0.71.

关键词:自由空间量子通信;环境因素;信道衰减;保真度;误码率

中图分类号:G301

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)12-1227003-5

Influences of Multiple Factors of Natural Environment on the Performance of Free Space Quantum Communication

REN Jie¹, NIE Min¹, YANG Guang^{1,2}, PEI Chang-xing³

(1 School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710061, China)

(2 School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3 State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an 710071, China)

Abstract: According to the particle size distribution function of the particles whose sizes are near to the wavelength of light, the relationships between quantum weak coherent optical signal attenuation and the atmospheric humidity, particle concentration, light signal wavelength, the particle diameter were analyzed. The effect of those environmental factors on the atmospheric visibility was discussed, and the influence of the atmospheric visibility and the angle of the telescope on the link attenuation for stratospheric quantum communication was analyzed. Meanwhile the quantitative relationships among quantum bit error rate, fidelity of the quantum signal and atmospheric visibility, transmission distance were put out and simulated. The simulation results show that, with the increase of atmospheric humidity and particle concentration, the link attenuation of quantum signal transmission is increasing, especially when the wavelength of optical signal is almost the same as the particle diameter, the link attenuation is the most significant. Under the premise of the transmission distance is 15 km and the angle of the telescope is 90, when the atmospheric visibility is 5 km and 15 km, the link attenuation, the quantum bit error rate and the fidelity of the quantum signal are 18.9 dB and 14.2 dB, 0.0105 and 0.0099, 0.22 and

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No. 2014JQ8318)和陕西省国际科技合作与交流计划项目(No. 2015KW-013)资助

第一作者:任杰(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为量子通信. Email:450205735@qq.com

导 师:聂敏(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为量子通信. Email:niemin@xupt.edu.cn

收稿日期:2015-06-23; **录用日期:**2015-09-24

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

0.71, respectively.

Key words: Free space quantum communication; Factors in natural environment; Link attenuation; Quantum bit error rate; Quantum fidelity

OCIS Codes: 270.5565; 010.1290; 060.2605

0 引言

自由空间量子通信主要在远离地面的空间环境下实现轨道卫星、平流层飞艇平台与地面之间的通信,是建立全球量子通信网必不可少的重要组成部分. 2012年,德国 MPQ (Max Planck Institute of Quantum Optics)与奥地利 IQOQI (Institute for Quantum Optics and Quantum Information)实现了自由空间光链路超过 143 km 的量子隐形传态通信^[1],为未来基于卫星的量子隐形传态提供了技术支持. 同年中国科学技术大学等联合研究团队,成功实现了百公里量级的自由空间量子隐形传态和纠缠分发^[2],验证建立全球卫星量子通信网络的可行性. 2013年,中国科技大学潘建伟团队成功实现无局域性漏洞的量子纠缠关联塌缩速度下限的测量^[3],为量子科学实验卫星进行大尺度理论基础检验奠定了技术基础. 2014年,意大利帕多瓦大学研究小组利用轨道角动量与光学偏振组合的旋转不变态进行信息编码^[4],实现了量子密钥分配协议,进一步推进了实现全球量子网络的进程. 文献[5]提出了一种基于纠缠态的量子中继通信系统,提高了量子通信系统的吞吐率,改善了量子中继器的预期性能. 文献[6]提出了一种提高量子态保真度的方法,对其退相干性可通过测量的方法进行补偿. 文献[7]提出一个基于四粒子 GHZ 纠缠态实现未知单粒子态的可控量子双向传态方案,大大地提高了整个双向传态的安全性. 文献[8]研究了扩散过程中弱相干光场量子特性的演化,讨论了扩散对光场压缩效应和反聚束效应的影响. 文献[9]研究了原子与耦合腔相互作用系统中量子态保真度演化,讨论了腔场间耦合系数变化对保真度演化的影响.

自由空间是一个相当复杂的环境系统,尤其是近几年来,环境恶化较为严重,地空之间的自然环境对无线量子通信性能的影响已不可小觑. 文献[10]讨论了带电沙粒的散射场及其对电磁波传播的影响,说明了沙尘天气静电场的作用不容忽视. 文献[11]研究了中尺度沙尘暴对卫星量子通信的影响,为沙尘条件下量子卫星通信的研究奠定了基础. 文献[12]基于米氏散射理论,研究了群雨滴对微波波段的散射及衰减状况.

本文以大气湿度、能见度、粒子直径、粒子浓度等为主要影响因子,分析了量子信号传输时的衰减、误码率、保真度等参量受这些影响因子的影响,并进行仿真实验验证,给出环境因子与链路参量的定量关系,为自然环境下的自由空间量子通信提供参照依据.

1 环境因素对链路衰减的影响

考虑大气中气溶胶分子和尘埃大颗粒物对自由空间量子传输的影响,大气中粒径为 D_i 的各种粒子的分布^[10,12]为

$$N(D_1) = \frac{C_1}{\sqrt{2\pi} \lg \delta} \exp \left[-\frac{(\lg D_1 - \lg D_m)^2}{2 \cdot (\lg \delta)^2} \right] \quad (1)$$

$$N(D_2) = \frac{C_2}{\sqrt{2\pi} \delta} \exp \left[-\frac{(D_2 - D_m)^2}{2\delta^2} \right] \quad (2)$$

式中 $N(D_1)$ 、 $N(D_2)$ 分别为气溶胶分子、尘埃大颗粒物的空间分布, C_i 为粒子浓度, $i=1,2$; D_m 为分子的平均粒径, δ 为标准偏差. 考虑到大气湿度对气溶胶粒径的影响^[13],则式中

$$D_1 = (1-H)^{-1/d} D_0 \quad (3)$$

式中 H 为大气湿度, d 为常系数, D_0 为干燥时气溶胶分子的粒径.

根据米氏散射理论,得到自然环境下的消光系数为

$$A_x = \frac{\pi}{4} \int_0^\infty D^2 \cdot N(D) \cdot Q(m, x) dD = \frac{\pi}{4} p_1 \int_0^\infty D_1^2 \cdot N(D_1) \cdot Q_1(m, x) dD_1 + \frac{\pi}{4} p_2 \int_0^\infty D_2^2 \cdot N(D_2) \cdot Q_2(m, x) dD_2 = p_1 A_1 + p_2 A_2 \quad (4)$$

式中, A_i 为各粒子的消光系数, p_i 为自然环境中各粒子所占的比例,且有

$$p_i = \frac{C_i}{C}, \quad \sum_i p_i = 1 \quad (5)$$

式(4)中, $Q_i(m_i, x_i)$ 为各粒子的消光因子,其表达式为

$$Q_i(m_i, x_i) = \frac{2}{x_i^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (6)$$

式中 m_i 为各粒子的复折射率; a_n, b_n 为米氏系数; x_i 为尺寸系数,且有

$$x_i = \frac{2\pi D_i}{\lambda} \quad (7)$$

式中 λ 为光信号波长.

则量子光信号传输时的链路衰减^[14] A 可表示为

$$A = 10 \cdot A_x \cdot \lg e \quad (8)$$

自然环境下空气湿度 H 、粒子相对浓度 C 、量子信号光波长 λ 和分子粒径 D 与链路衰减 A 的关系见图 1 和图 2.

从图 1 可以看出,空气湿度 H 已知时,随着粒子相对浓度 C 的增大,量子信号的传输链路衰减 A 逐渐增大. 若粒子相对浓度 C 已知,随着空气湿度 H 的增大,量子信号的传输链路衰减 A 亦逐渐增大. 当二者都

为最小值时,链路衰减最小,与晴朗天气状况一致;当二者都为最大值时,链路衰减最大,此时天气条件恶劣,无线量子通信难以有效进行。

从图2可以看出,当光波长 λ 与分子粒径 D 大小相差不大时,此时链路衰减 A 最大,这是由米氏散射效应最大所引起的.因此,选择适当波长的光进行量子信号的传输,可有效地降低链路衰减。

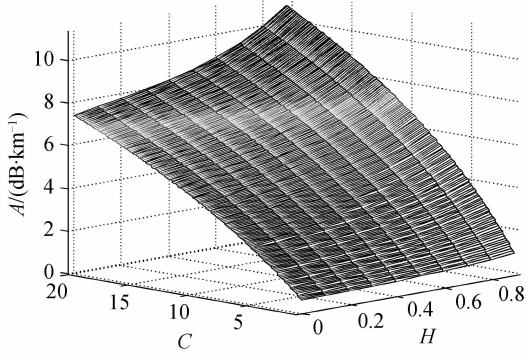


图1 空气湿度、粒子浓度与链路衰减的关系
Fig. 1 Relationship between air humidity, particle concentration and link attenuation

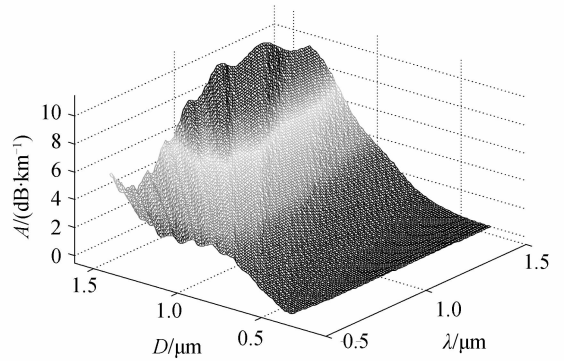


图2 光波长、粒子粒径与链路衰减的关系
Fig. 2 Relationship between optical wavelength, particle size and link attenuation

2 平流层通信的链路衰减

利用悬浮于平流层的通信平台和地面站可实现平流层通信.这种新型空间通信模式涉及两个主要光路:地面与平流层平台之间以及平流层平台与平台之间的光传输,通信模式如图3。

根据平流层的大气特点,平流层平台与平台之间的通信可忽略大气影响.地面与平流层平台之间通信时,主要考虑复杂的大气环境对量子信号的影响。

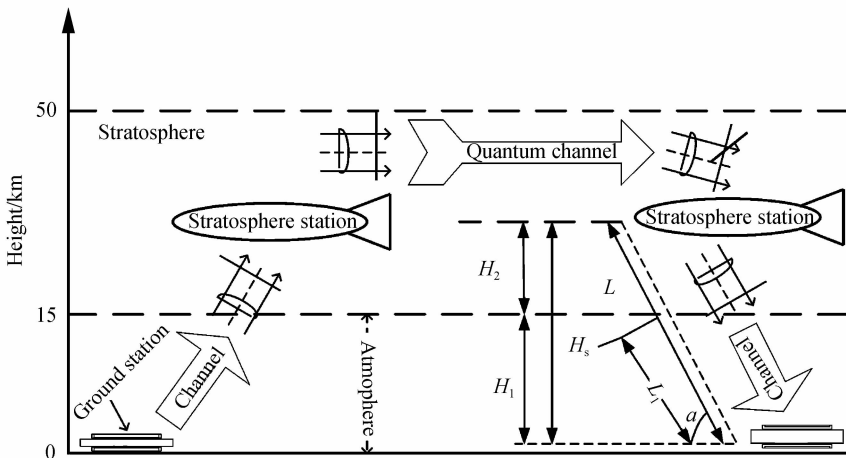


图3 平流层量子通信系统的典型光路系统
Fig. 3 A typical optical path system for stratospheric quantum communication system

为了便于分析复杂的大气环境因子对空间链路的影响,引入能见度 V 来综合不同的环境因子.根据文献[15]及式(4)有

$$V = -\ln 0.02/A_x \quad (9)$$

则空气湿度 H 、粒子浓度 C 与能见度 V 的关系如图4。

从图4中可以看出,随着空气湿度 H 和粒子相对浓度 C 的增大,能见度 V 逐渐降低,随着二者的减小,能见度逐渐增大.当其中一个参量已知时,随着另一个参量的增大或减小,能见度也增大或减小,与实际情况相吻合。

参照图3,以波长 $\lambda=860\text{ nm}$ 的光信号进行通信,

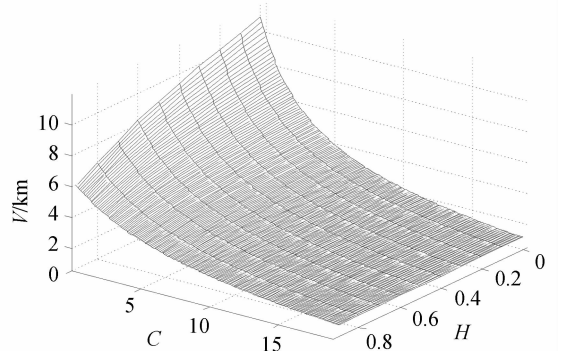


图4 空气湿度、粒子浓度与能见度的关系
Fig. 4 Relationship between air humidity, particle concentration and atmospheric visibility

忽略光学器件引起的衰减,则地面站与平流层平台之间的链路衰减 A_{GS} 为

$$A_{GS} = A \cdot L_1 + \kappa(L - L_1) \quad (10)$$

式中 L_1 为地面至平流层之间的传输长度, κ 为平流层的衰减常数, L 为总的传输距离^[14], 且有

$$L = \sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + H_s^2} + 2RH_s - R \sin \alpha \quad (11)$$

式中 R 为地球曲率半径, α 为发射或接受望远镜的倾角, H_s 为平流层平台距地面的距离。

根据式(9)~(11), 取 $R = 6378$ km, $H_s = 30$ km, 则能见度 V 、倾角 α 与链路衰减 A_{GS} 的关系的仿真如图5。

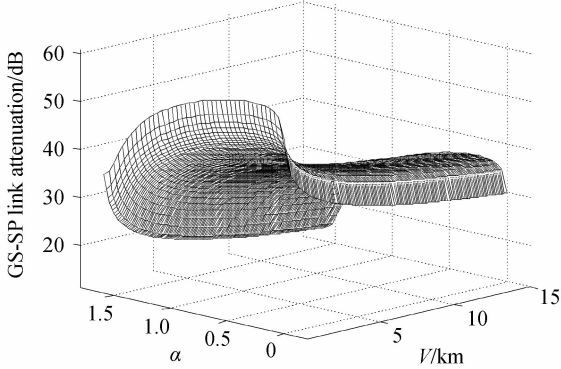


图5 能见度、倾角与链路衰减的关系

Fig. 5 Relationship between atmospheric visibility, angle of the telescope and link attenuation

从图5中可以看出,当能见度 $V = 15$ km 已知时,链路衰减随着倾角 α 的增大而减小,这说明倾角的增大意味着链路传输距离的减小,而且当 $\alpha = \pi/2$ 时,此时链路衰减达到最小值 14.2 dB. 同时可以看出,当倾角 α 已知时,链路衰减随着能见度的增加成指数形式衰减。

3 环境因素对量子通信的信道误码率及保真度的影响

3.1 信道误码率

对于采用 BB84 协议进行量子密钥分发的系统,量子误码率 R_B 为接收到的误码比特率 R_e 与总比特率 R_s 的比值^[16-17], 即

$$R_B = \frac{R_e}{R_s} = \frac{\eta n (1 - \zeta) \exp(-4\eta M) + \zeta \eta n \exp(-\eta M)}{F_s R_s [1 - \exp(-u T_c P T_a \eta F)]} \quad (12)$$

式中, $M = \exp(-AL) + 4n$, η 为光电探测量子效率, L 为传输距离, $n_s = n_B/2 + n_D$, n_B 为背景噪声引起的光子计数, n_D 为光电探测器的暗电流计数, ζ 为退极化效应因子, F_s 为筛选因子, R_s 发射脉冲重复率, F_c 为测量因子, μ 为激光脉冲平均光子数, T_a 为系统传输率, P 为单光子捕获率, T_c 为信道传输因子, 且有

$$T_c = T_0^{\sec \theta} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\sec \theta} = 10^{-0.1 A_{\text{atm}} \sec \theta} \quad (13)$$

式中 θ 为高斯光束远场发射角。

取量子光信号波长 $\lambda = 0.86$ μm , 采用高斯基模光

束作为光源脉冲, 其余参量取值见表1, 综合式(4)、(9)、(10)和(11), 得到能见度 V 、传输距离 L 与通信链路误码率 R_B 的关系见图6。

表1 信道误码率的各参量取值

| Table 1 The parameters of channel bit error rate | | | | | |
|--|-------|----------|-------|-----------|-----------|
| η | F_c | F_s | R_s | n_D | n_B |
| 0.65 | 1 | 0.5 | 0.5 | 10^{-6} | 10^{-3} |
| P | T_a | θ | μ | ζ | |
| 0.5 | 1 | 20 | 1 | $0(p')$ | |

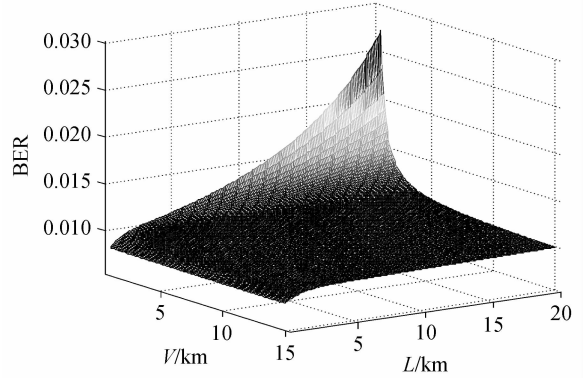


图6 能见度、传输距离与误码率的关系

Fig. 6 Relationship between atmospheric visibility, transmission distance and quantum bit error rate

从图6中可以看出,当能见度 $V = 15$ km 时,此时环境状况较为理想,链路的误码率 R_B 随着传输距离的增加,缓慢增长,但变化不大. 当能见度较低时,环境状况恶劣,误码率随着距离的增加,急剧增大,严重影响自由空间的量子通信. 同时,当传输距离已知时,能见度也影响着误码率,能见度越大误码率越低。

3.2 信号保真度

光信号通过自由空间被平流层平台接受后,其湮没算符 α_{kv} 将变为^[18]

$$\alpha_{kv} \rightarrow \exp(ikL - A_X L/2) \alpha_{kv} + i \sqrt{A_X} \int_0^L dx \cdot$$

$$\exp[(ik - A_X/2)(L - x)] \hat{b}(\omega) \quad (14)$$

式中

$$k = \omega m/c \quad (15)$$

式中, ω 为光波的角频率, c 为光速, $\hat{b}(\omega)$ 为外部场所致的衰减。

量子态 $|\text{NOON}\rangle$ 到达平流层平台后,变为 $|\text{NOON}'\rangle$, 且有

$$|\text{NOON}'\rangle = |\text{NOON}\rangle e^{(-i\omega/c - \chi_s/2)NL_{\text{atm}}(\theta)} + |\Phi\rangle \quad (16)$$

式中, $|\Phi\rangle$ 代表因 $\hat{b}(\omega)$ 对 α_{kv} 的贡献而已在 NOON 基底以外被散射的态。

$$\text{而最终被平流层接收平台所检测出来的态为 } |\text{END}\rangle = |\text{NOON}'\rangle - |\Phi\rangle \quad (17)$$

结合式(11), 得到链路通信之间的保真度^[19] F 为

$$F = \text{tr}(\sqrt{\langle \text{NOON} | \rho | \text{NOON} \rangle}) =$$

$$\exp [2L/(\ln 0.02V)] \quad (18)$$

式中, ρ 为量子态 $|END\rangle$ 的密度算子。

则能见度 V 、传输距离 L 与通信链路保真度 F 的关系见图 7。

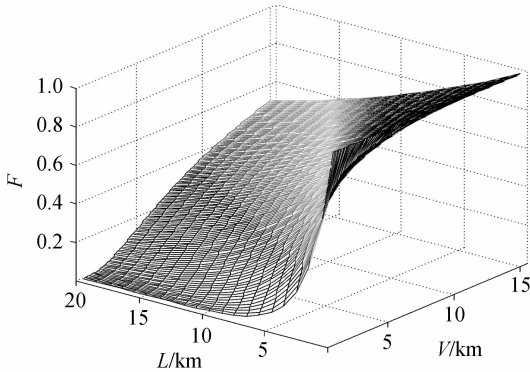


图 7 能见度、传输距离与保真度的关系

Fig. 7 Relationship between atmospheric visibility, transmission distance and quantum fidelity

图 7 中可以看出,传输距离 L 已知时,随着能见度 V 的增加,自然环境对量子信号的影响逐渐减小,链路的保真度 F 逐渐增大,可实现较好地通信.而当能见度已知时,随着距离的增加,环境对量子信号的影响也在增加,链路保真度逐渐减小.由此可见,为了保证通信质量,保真度与传输距离需折中选取。

4 结论

本文研究了自然环境下,大气湿度、粒子浓度、粒子粒径以及能见度对自由空间量子通信性能的影响.针对平流层量子通信,分析了影响因子与通信链路中的衰减、信道误码率和信号保真度等参量的定性和定量关系,并进行了仿真实验验证.结果表明,与量子光信号波长相近的粒子对自由空间量子通信性能的影响较为显著,且随着大气湿度、粒子浓度和能见度的变化,通信链路的性能也发生变化.因此,本文所提出的各参量之间的定量关系可为自由空间量子通信提供参照依据,使系统自适应调整通信参量,从而降低自然环境各因子对自由空间量子通信性能的影响。

参考文献

[1] MA X S, HERBST T, SCHEIDL T, *et al.* Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward[J]. *Nature*, 2012, **489**(7415): 269-273.
 [2] YIN J, REN J G, LU H, *et al.* Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. *Nature*, 2012, **488**(7410): 185-188.
 [3] YIN J, CAO Y, YONG H L, *et al.* Lower bound on the speed of nonlocal correlations without locality and measurement choice loopholes[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(26): 260407.
 [4] GIUSEPPE V, VINCENZO D, ANNA S, *et al.* Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons

[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(6): 060503.
 [5] PEI Chang-xing, YAN Yi, LIU Dan, *et al.* A quantum repeater communication system based on entanglement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2422-2426.
 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.
 [6] LIAO X P, FANG M F, FANG J S, *et al.* Preserving entanglement and the fidelity of three-qubit quantum states undergoing decoherence using weak measurement[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(2): 020304.
 [7] HU Yu-an, YE Zhi-qing. Controlled two-way quantum teleportation via ghz quadripartite entangled state and security [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0827001.
 胡钰安, 叶志清. 基于四粒子 GHZ 态的可控量子双向隐形传态及安全性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0827001.
 [8] QIU Chang-dong, LU Dao-ming. Decoherence of weak coherent state in the diffusion process [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0227002.
 邱昌东, 卢道明. 扩散过程中弱相干光场的退相干[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2): 0227002.
 [9] LU Dao-ming. Evolution of fidelity in the system of atoms interacting with coupled cavities[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0627001.
 卢道明. 原子与耦合腔相互作用系统中量子态保真度演化 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(6): 0627001.
 [10] MIN Xing, LI Xing-cai, LI Xin-wan, *et al.* Effects of charged sandstorm on electromagnetic wave propagation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 0129001.
 闵星, 李兴财, 李新碗, 等. 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响[J]. *光学学报*, 2015, **35**(1): 0129001.
 [11] NIE Min, SHANG Peng-gang, YANG Guang, *et al.* Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(24): 240303.
 聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, **63**(24): 240303.
 [12] LIU Xi-chuan, GAO Tai-chang, QIN Jian, *et al.* Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 2156-2162
 刘西川, 高太长, 秦健, 等. 降雨对微波传输特性的影响分析 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(3): 2156-2162.
 [13] CAI Jia, GAO Juan, FAN Zhi-guo, *et al.* The polarization characteristic research of aerosol particles under the humidity influence[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(5): 639-644.
 蔡嘉, 高隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性[J]. *发光学报*, 2013, **34**(5): 639-644.
 [14] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京:军事科学出版社, 2006: 49.
 [15] FU Gang, LI Xiao-lan, WEI Na. Review on the atmospheric visibility research [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, **39**(5): 855-862.
 傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, **39**(5): 855-862.
 [16] 阎毅. 自由空间量子通信若干问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.
 [17] YAN Yi, PEI Chang-xing, HAN Bao-bin, *et al.* Study of propagating on Earth-space paths in stratospheric quantum communication system [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, **23**(5): 834-837+846.
 阎毅, 裴昌幸, 韩宝彬, 等. 平流层量子通信系统地空路径传播特性研究[J]. *电波科学学报*, 2008, **23**(5): 834-837+846.
 [18] 马尔科 L. 量子雷达[M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 等译, 北京:电子工业出版社, 2013: 15-17.
 [19] 尼尔森, 庄. 量子计算和量子信息(二)[M]. 郑大钟, 赵千川, 译. 北京:清华大学出版社, 2005: 57.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61172071, 61201194), the Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province (No. 2014JQ8318) and the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program of Shaanxi Province (No. 2015KW-013)