

doi: 10.3788/gzxb20174607.0701002

# 灰霾粒子与水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能影响

聂敏<sup>1</sup>, 常乐<sup>1</sup>, 杨光<sup>1,2</sup>, 张美玲<sup>1</sup>, 裴昌幸<sup>3</sup>

(1 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

(2 西北工业大学 电子信息工程学院, 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:**为了研究混合粒子的不同混合方式对星地量子卫星通信的影响,根据灰霾粒子与水云粒子的谱分布函数,以及不同混合方式下的消光系数,提出了外混合方式中星地量子信道衰减的计算关系,建立了内混合方式中的 Core-shell 信道衰减模型;分析了在不同混合方式下,混合粒子的粒径比与信道平均保真度、信道误码率之间的定量关系.仿真结果表明,当混合粒子的粒径比分别为 0.2 和 0.8 时,外混合粒子对应信道容量、信道平均保真度、信道误码率分别为 0.39 和 0.27, 0.8 和 0.8, 0.003 和 0.009;内混合粒子对应信道容量、信道平均保真度、信道误码率分别为 0.8 和 0.21, 0.94 和 0.81, 0.018 和 0.021.由此可见,灰霾粒子和水云粒子的不同混合方式对量子卫星通信性能的影响有显著差别.因此,在实际的量子卫星通信系统中,应根据混合粒子的不同混合方式自适应调整系统的各项参量,以提高星地量子通信链路的可靠性.

**关键词:**量子通信;消光系数;Core-shell 信道衰减模型;混合气溶胶粒子;粒径比;信道容量;保真度;误码率

**中图分类号:**P426.5+1;P427.1+22 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2017)07-0701002-10

## Influence of Different Mixing Patterns of Haze Particles and Water Cloud Particles on the Performance of Quantum Satellite Communication

NIE Min<sup>1</sup>, CHANG Le<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>1,2</sup>, ZANG Mei-ling<sup>1</sup>, PEI Chang-xing<sup>3</sup>

(1 School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

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

(3 State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of different mixing patterns of mixed particles on the quantum satellite communication, according to the spectral distribution function of hazeparticles and water-cloud particles and the extinction factor in different mixing patterns, the attenuation relationship of the quantum satellite communication channel in external mixing mode was proposed, and the Core-shell channel attenuation model was established. Thus the quantitative relation among the volume ratio of the mixed particles, fidelity of quantum communication and channel bit error rate were analyzed and simulated. The simulation results show that, when the volume ratio of mixing particles is 0.2 (0.8), the channel capacity, channel average fidelity and the channel bit error rate of external mixing mode will be

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61172071)、陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2014JQ8318)、陕西省国际科技合作与交流计划项目(No. 2015KW-013)和陕西省教育厅科研计划项目(No. 16JK1711)资助

**第一作者:**聂敏(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为量子通信、移动通信、现代通信网理论和关键技术. Email:niemin@xupt.edu.cn

**通讯作者:**常乐(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为量子通信、移动通信. Email:515545055@qq.com

**收稿日期:**2017-02-10; **录用日期:**2017-04-20

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

0.39 (0.27), 0.8 (0.8) and 0.003 (0.009), respectively; the channel capacity, channel average fidelity and the channel bit error rate of external mixing mode will be 0.8 (0.21), 0.94 (0.81) and 0.018 (0.021), respectively. It can be seen that the influence of different mixing modes of haze aerosol and water cloud particles on the communication performance of quantum satellite is different. Therefore, the parameters of the communication system should be adjusted adaptively based on the different mixing patterns to improve the reliability of the quantum satellite communication.

**Key words:** Quantum communication; Extinction factor; Core-shell channel attenuation model; Mixed aerosol particles; Volume fraction; Channel capacity; Fidelity; Bit error rate

**OCIS Codes:** 010.1110; 010.1615; 270.5655; 290.1090

## 0 引言

量子卫星通信技术具有绝对保密、通信容量大、传输速度快等优点,是当今信息时代的研究热点之一. 2005年,中国科技大学的潘建伟小组实现了纠缠光子对的自由空间分发实验,光子对分发距离达到13 km,验证了穿越大气层进行纠缠分发的可能性<sup>[1]</sup>. 2008年,意大利和奥地利科学家首次识别出从地球上空1500 km处的人造卫星上反弹回地球的单光子,实现了太空量子保密通信的重大突破. 2012年,中国和奥地利科学家分别实现了百公里量级的量子隐形传态,为星地间量子通信技术研究奠定了坚实基础<sup>[2]</sup>. 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<sup>[3]</sup>,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;同年5月,中科院在国际上首次成功实现星地量子密钥分发的全方位地面试验<sup>[2]</sup>. 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<sup>[4]</sup>,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.

当进行量子卫星通信时,量子态不可避免地受到沙尘暴、近地面大气湍流等自然环境等不可抗因素的影响. 文献[5]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[6]研究了近地面大气湍流对自由空间量子通信的影响. 西安电子科技大学的裴昌幸团队<sup>[7]</sup>,研究了平流层量子通信系统传播特性,结果表明地空路径传播效应对系统的量子密钥分发结果产生重要影响. 然而,目前国内外关于灰霾条件下大气气溶胶粒子和水云粒子的不同混合方式对量子卫星信道影响的研究尚未展开.

灰霾是悬浮在空气中的大量细小尘粒、烟粒或盐粒等集成的气溶胶颗粒物和气体的散射、消光等作用所导致空气浑浊、水平能见度小于10 km的一种天气现象. 近年来,随着中国工业化和城市化进程的加快,大气污染物排放量逐渐增加,灰霾天气越来越频繁<sup>[8]</sup>. 2013年Chew等<sup>[9]</sup>通过对新加坡和马来西亚的细颗粒物的测量,发现霾粒子物理光学参量存在变异性增加. 文献[10]通过对霾与非霾天气大气气溶胶物理特性对比研究表明:灰霾天气发生时,气溶胶质量浓度、黑炭浓度和散射系数随着霾等级的增加均呈现明显的阶梯上升趋势. 由于地球大气中约有50%的空间被各种云层覆盖,因此,灰霾条件下大气中的气溶胶粒子(灰霾粒子)不可避免地会与水云粒子混合,当光子在星地链路之间传输时,水云粒子与灰霾粒子会产生散射与吸收等消光效应,使星地量子通信性能受到影响. 在目前的量子卫星通信中,考虑气溶胶粒子系统的影响时,往往假定其为单一成分的均匀体,一般都不区分其混合状态<sup>[11]</sup>,然而,实际的气溶胶粒子并不是单一成分的,而是由不同成分组成的混合体. 研究表明,当气溶胶粒子中的各种不同成分所处的混合状态不同时,其光散射特性有明显差异<sup>[12-15]</sup>. Lesins<sup>[16]</sup>指出在内外混合方式下气溶胶粒子光学性质的差异可能达到25%以上. 张小林等<sup>[17]</sup>使用了包含三种成分的包裹型内混合模型组成的气溶胶的光学性质,讨论了等效复折射率在描述内混合气溶胶系统时的适用性. 文献[18]表明了气溶胶的不同混合状态会对其光学性质造成极大影响. 因此,研究水云粒子和灰霾粒子在不同混合状态下的消光特性及其对量子卫星通信性能的影响具有重要意义.

本文主要针对水云粒子和灰霾粒子的不同混合方式,即典型外混合模型(External Mixing mode, EM)和内混合模型中的Core-shell模型(Core-shell Internal Mixing mode-Core-shell, IMCS),提出了灰霾粒子与水云粒子在不同混合方式下的粒径比变化、云层厚度与星地量子信道衰减的关系;针对振幅阻尼信道,分别分析不同混合方式下的混合粒子粒径比与信道平均保真度、信道误码率之间的关系,并进行仿真验证.

## 1 灰霾粒子和水云粒子不同混合方式的物理模型

大气中大部分气溶胶粒子是由多种成分混合形成的<sup>[18]</sup>,当灰霾粒子中的硫酸盐、硝酸盐和含碳气溶胶

等刚从燃烧源排放出来时,与水云粒子相互独立存在,此时混合粒子处于外混合状态.随着碰并、蒸汽凝结、云/雾过程等各种老化过程的进行,灰霾粒子表面会吸附水云粒子,此时混合粒子处于内混合状态<sup>[19]</sup>.图1描绘了水云粒子和灰霾粒子的混合方式,其中图1(a)表示典型外混合模型,水云粒子和灰霾粒子分别以球型独立存在且不发生二次散射;图1(b)为 Core-shell 模型,由水云粒子包裹灰霾粒子形成分层球结构, $a$  为水云粒子半径, $b$  为灰霾粒子半径.

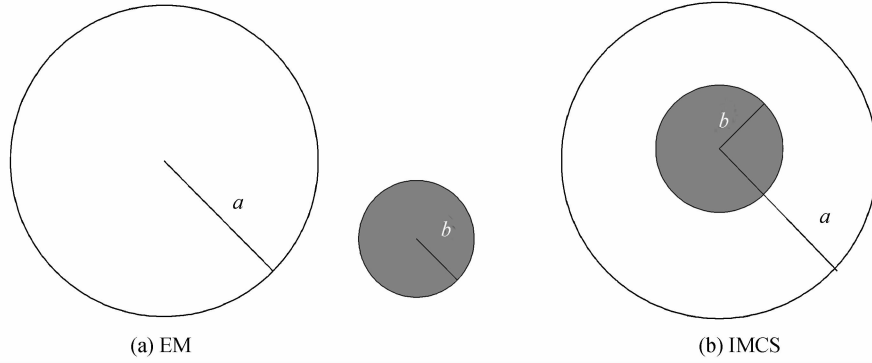


图1 不同混合模型

Fig.1 Different mixture models

由于外混合状态下不同的气溶胶粒子之间并不发生理化作用,而是以球型粒子独立存在于大气中,粒子间发生独立散射,即光量子信号经一个粒子散射后不再被另一个粒子散射,外混合光量子信号传输模型如图2(a)所示,而内混合状态下粒子内部会发生多次散射,其信号传输模型如图2(b)所示.

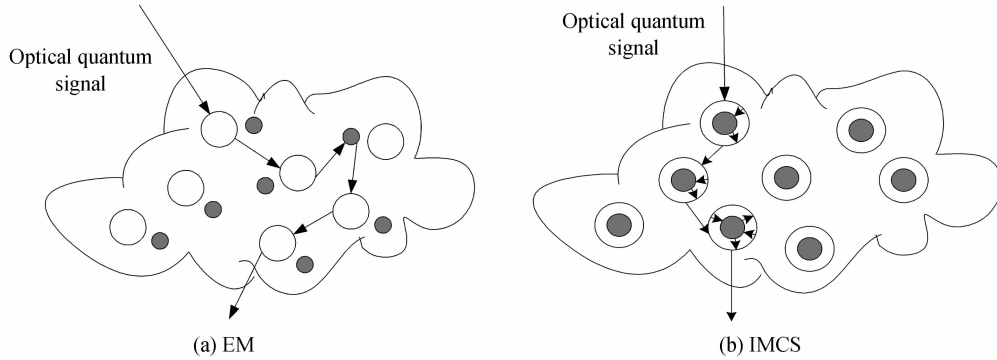


图2 量子信息在不同混合方式下的传输模型

Fig.2 The transfer model of quantum information under different mixing modes

## 2 不同混合方式对量子卫星通信性能的影响

### 2.1 对量子卫星链路衰减的影响

当地面和卫星之间进行通信时,发送端光子自身会携带一定的能量,当光子与混合粒子发生碰撞后,会受到混合粒子的吸收和散射效应,从而导致光子能量衰减甚至消散.在实际大气中,每次碰撞后的光子的总衰减系数即消光系数<sup>[20]</sup>为混合粒子的散射系数和吸收系数之和.

根据 Mie 散射理论可以得到水云粒子的消光系数<sup>[21]</sup>为

$$k_{\text{ext1}} = \int_{r_{\text{min1}}}^{r_{\text{max1}}} \pi r_1^2 Q_{\text{el}}(r_1, \lambda, m_1) n(r_1) dr \quad (1)$$

式中, $n(r_1)$ 是水云粒子的谱分布; $r_1$ 为水云粒子半径, $r_{\text{max1}}$ 和 $r_{\text{min1}}$ 是水云粒子的上下限, $r_{\text{max1}} = 12.6 \mu\text{m}$ , $r_{\text{min1}} = 1.26 \mu\text{m}$ ;  $Q_{\text{el}}(r_1, \lambda, m_1)$ 为水云粒子的消光效率因子,可以表示为

$$Q_{\text{el}}(r_1, \lambda, m_1) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

式中, $m_1$ 是水云在入射波长 $\lambda$ 下的复折射率<sup>[18]</sup>, $m_1 = 1.33 - 1.96 \times 10^{-9}i$ , $a_n$ 、 $b_n$ 为 Mie 系数, $x$ 为尺度参量,可以表示为

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (3)$$

水云粒子谱分布为<sup>[13]</sup>

$$n_w(r_1) = kr_1^{(1-3\beta)/\beta} \exp\left(\frac{-r_1}{\alpha\beta}\right) \quad (4)$$

式中,  $k$  为归一化常量, 取  $k=2.373$ ,  $\alpha=r_{ef}$ ,  $\beta=v_{ef}$ ,  $r_{ef}$  为有效半径,  $v_{ef}$  为有效方差.

由于灰霾粒子组成成分多样, 其中硫酸盐、硝酸盐和含碳气溶胶等化学成分是主要的消光因素, 假设灰霾粒子中各组分气溶胶均为均质球形粒子, 其消光系数表示为<sup>[22]</sup>

$$\delta_{ext} = 3(1+H)n_{SN} + 4n_{organics} + 10n_{soot} + 1n_{soil} + 0.6n_{coarse-mass} + 10k_s = [3(1+H)P_1 + 4P_2 + 10P_3 + 1P_4 + 0.6P_5] \cdot C_m + 10 \quad (5)$$

式中, 各项系数为每种化学成分的干消光率,  $H$  表示大气平均相对湿度, 取  $H=0.5$ ;  $n_{SN}$ 、 $n_{organics}$ 、 $n_{soot}$ 、 $n_{soil}$  和  $n_{coarse-mass}$  分别表示灰霾粒子中的硫酸盐和硝酸盐、有机物、黑炭、扬尘和直径为  $2.5 \mu\text{m} \leq D \leq 10 \mu\text{m}$  颗粒物的组分浓度,  $P_i$  为各组分在灰霾浓度  $C_m$  中所占的比例.  $k_s$  表示清洁大气对光的散射系数.

灰霾粒子中  $D < 2.5 \mu\text{m}$  颗粒物的 Mie 散射消光系数<sup>[23]</sup>为

$$\chi_{ext} = \int_{r_{min2}}^{r_{max2}} \pi r_2^2 Q_{e2}(r_2, \lambda, m_2) \cdot \frac{1}{r_2 \ln 10} \cdot \frac{dN(r_2)}{d(\log r_2)} dr_2 \quad (6)$$

式中,  $N(r_2)$  为灰霾粒子谱分布;  $r_2$  为水云粒子半径,  $r_{max2}$  和  $r_{min2}$  是灰霾粒子的上下限,  $r_{max2} = 1.0 \mu\text{m}$ ,  $r_{min2} = 0.01 \mu\text{m}$ ;  $Q_{e2}(r_2, \lambda, m_2)$  为灰霾粒子的消光效率因子, 可以表示为

$$Q_{e2}(r_2, \lambda, m_2) = \frac{2}{y^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (7)$$

式中,  $m_2$  是灰霾粒子在入射波长  $\lambda$  下的平均复折射率,  $m_2 = 1.75 + 0.44i$ ;  $a_n$ 、 $b_n$  为 Mie 系数,  $y$  为尺度参量, 可以表示为

$$y = \frac{2\pi b}{\lambda} \quad (8)$$

灰霾粒子的粒度谱分布采用对数正态分布进行拟合, 即

$$n(r_2) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_s} \exp\left[-\frac{(\ln r_2 - \ln r_0)^2}{2(\ln \sigma_s)^2}\right] \quad (9)$$

式中,  $r_0$  为众数半径, 取  $r_0 = 0.13 \mu\text{m}$ ;  $\sigma_s$  为几何粒径标准差, 取  $\sigma_s = 1.8$ .  $N$  为单位体积大气中灰霾的粒子数,  $r_2$  为灰霾粒子半径.

则灰霾粒子的总消光系数为

$$k_{ext2} = a\delta_{ext} + (1-a)\chi_{ext} \quad (10)$$

式中  $a$  为加权系数.

当混合粒子为 EM 时, 粒子间发生独立散射, 总的消光系数可表示为

$$k_{ext} = \frac{4/3\pi a^3}{4/3\pi a^3 + 4/3\pi b^3} k_{ext1} + \frac{4/3\pi b^3}{4/3\pi a^3 + 4/3\pi b^3} k_{ext2} \quad (11)$$

当混合粒子为 IMCS 时, 根据 Bohren 等提出的分层球 Mie 散射理论<sup>[14]</sup>, 总的消光系数可表示为

$$k_{ext} = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} Q_e(r) C(r) n_m(r) dr}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} C(r) n_m(r) dr} \quad (12)$$

式中,  $r$  是内混合同心球粒子的半径;  $C(r) = \pi a^2$  表示同心球粒子的投影面积,  $r_{max}$  和  $r_{min}$  是内混合同心球粒子的上下限, 取  $r_{max} = 12.6 \mu\text{m}$ ,  $r_{min} = 1.26 \mu\text{m}$ ,  $n_m(r)$  是同心球粒子的谱分布,  $Q_e(r)$  是混合同心球粒子的消光效率因子, 表示为

$$Q_e(r, \lambda, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a'_n + b'_n) \quad (13)$$

式中,  $a'_n$ 、 $b'_n$  是内混合同心球粒子的 Mie 系数,  $m$  是其等效复折射率.

$$n_m(r) = \frac{b^3}{a^3} k r_1^{(1-3\beta)/\beta} \exp\left(\frac{-r_1}{\alpha\beta}\right) + \left(1 - \frac{b^3}{a^3}\right) \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln\sigma_s} \exp\left[-\frac{(\ln r_2 - \ln r_0)^2}{2(\ln\sigma_s)^2}\right] \quad (14)$$

当量子信息在地面与卫星之间进行传输时,由混合粒子所导致的能量衰减<sup>[23]</sup>为

$$E = E_0 e^{-k_{\text{ext}} h} \quad (15)$$

式中,  $E_0$  为量子信息的初始能量,  $E$  为量子信息传输  $h$  后的能量, 其中  $h$  为云层厚度.

采用对数形式, 可得链路衰减因子为

$$A_{\text{lat}} = 10 \cdot k_{\text{ext}} \cdot \lg e \cdot h \quad (16)$$

采用波长为  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  的光信号进行量子通信, 其余参量见表 1.

表 1 链路衰减系数参量取值

Table 1 The parameters of link attenuation coefficient

$\alpha$	$\beta$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$a$
6	1/9	0.25	0.12	0.23	0.35	0.03	0.95

分别对灰霾粒子和水云粒子在不同混合方式下两种混合粒子的粒径比和云层厚度对量子卫星链路的影响进行仿真, 仿真结果如图 3 所示. 图 3 中  $b/a$  轴表示混合粒子的粒径之比, 取值范围为  $0 \sim 1$ ;  $h$  表示云层厚度, 取值范围为  $0 \sim 2$  km.

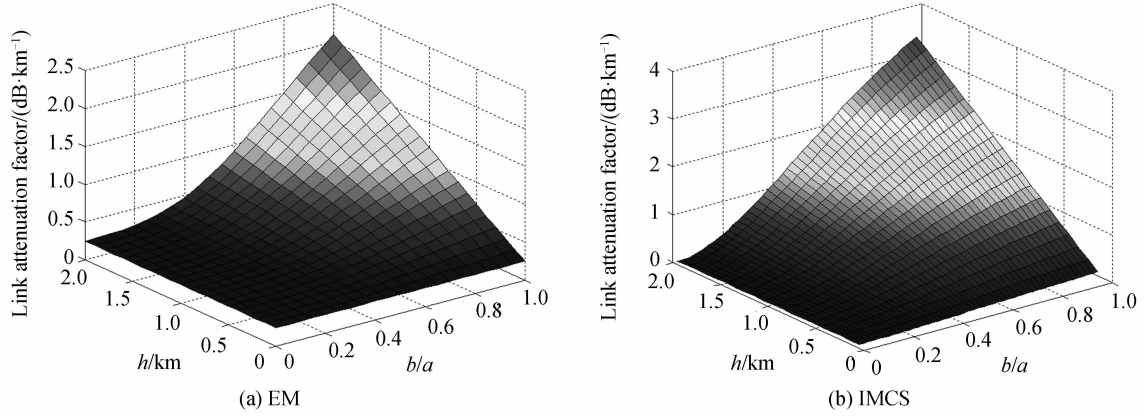


图 3 链路衰减与粒径比、云层厚度的关系

Fig. 3 Relationship between link attenuation and volume ratio, cloud thickness

由图 2、图 3 可以看出, 两种混合方式下, 当云层厚度保持不变时, 随着混合粒子粒径比的增大, 灰霾粒子所占比重增加, 光子在混合灰霾粒子的水云内部发生的碰撞次数增多, 所导致的能量衰减越大, 对链路衰减的影响呈上升趋势, 且都在  $b/a=1$  和  $h=2$  处达到最大值. 当粒径比一定时, 随着云层厚度的增加, 参与散射的混合粒子越多, 链路衰减也随之增加; 当粒径比为 0.8, 云层厚度由 0.2 km 增加到 1.5 km 时, EM 中链路衰减达从 0.36 dB 增加到 1.1 dB; IMCS 中链路衰减达从 0.27 dB 增加到 2.1 dB. 当云层厚度为 1.5 km, 粒径比由 0.2 增加到 0.9, EM 中链路衰减达从 0.25 dB 增加到 1.4 dB; IMCS 中链路衰减达从 0.24 dB 增加到 2.06 dB. 由此可见, 灰霾和水云粒子的内混合方式对链路衰减的影响大于外混合方式. 随着云层厚度的增加, 混合粒子粒径比越来越大时, 会严重影响量子卫星通信系统的性能.

## 2.2 对振幅阻尼信道容量的影响

量子信号在卫星与地面之间传播时, 光子量子态不可避免的会与环境量子态发生相互作用, 导致量子退相干<sup>[24-25]</sup>.

设混合粒子环境的初态为  $|e_A\rangle$ ; 量子系统的基态为  $|0\rangle$ , 激发态为  $|1\rangle$ . 当两者发生相互作用后, 量子位激发态会以概率  $p$  衰变到  $|0\rangle$  态, 使环境量子态以概率  $p$  跃迁到  $|e_B\rangle$  态, 这个过程可以用作用到量子位与混合粒子环境组成的复合系统上的么正演化表示为

$$U: \begin{cases} |0\rangle|e_A\rangle \rightarrow |0\rangle|e_A\rangle \\ |1\rangle|e_A\rangle \rightarrow \sqrt{1-p}|1\rangle|e_A\rangle + \sqrt{p}|0\rangle|e_B\rangle \end{cases} \quad (17)$$

则在混合粒子环境基  $\{|e_A\rangle, |e_B\rangle\}$  中, 超算符  $\mathcal{E}$  的两个 Kraus 算符<sup>[26]</sup>为

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $p$  为量子位在比特翻转信道中,受混合粒子影响丢失一个光子的概率<sup>[15]</sup>,可以表示为

$$p = \frac{E_a - E}{E_a} = 1 - e^{-k_{\text{ext}} \cdot h} = 1 - 10^{-0.1A_{\text{lat}} \cdot h} \quad (20)$$

于是量子系统的初始化密度矩阵  $\rho = \begin{bmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{bmatrix}$  演化为

$$\rho \rightarrow \varepsilon(\rho) \equiv \mathcal{E}(\rho) = \mathbf{B}_0 \rho \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \rho \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \rho_{00} + p\rho_{11} & \sqrt{1-p}\rho_{01} \\ \sqrt{1-p}\rho_{10} & (1-p)\rho_{11} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中,  $\varepsilon(\rho)$  表示初始化密度矩阵经过环境演化后所得的矩阵,  $\mathcal{E}$  是一个映射, 表示量子系统和环境作用后的演化.

设信道容量为  $C$ , 信源为  $\{p_i, \rho_i\}$ , 其中  $p_i$  为信源的量子字符取  $\rho_i$  时的概率,  $\sum p_i = 1$ . 若输入字符为  $\rho_0 = |0\rangle\langle 0|$ ,  $\rho_1 = |1\rangle\langle 1|$ , 则量子系统经过与环境态互相作用后的状态将演化为

$$\rho \rightarrow \varepsilon(\rho) \equiv \mathcal{E}(\rho) = \begin{bmatrix} 1 + p p_1 - p_1 & 0 \\ 0 & (1-p)p_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

对应的诺依曼熵为

$$s[\varepsilon(\rho)] = -(1 + p p_1 - p_1) \log(1 + p p_1 - p_1) - (1-p)p_1 \log(1-p)p_1 \quad (23)$$

收到的字符的诺依曼熵为

$$s = p_1 [-p \log p - (1-p) \log(1-p)] = p_1 H(p) \quad (24)$$

式中  $H(p)$  为二元熵.

因此振幅阻尼信道的信道容量为

$$C = \max \left\{ s[\varepsilon(\rho)] - \sum_i p_i s[\varepsilon(\rho_i)] \right\} = \max \left\{ -(1 + p p_1 - p_1) \log(1 + p p_1 - p_1) - (1-p)p_1 \log(1-p)p_1 - p_1 H(p) \right\} \quad (25)$$

对式(25)进行求导, 当

$$p_1 = \frac{1}{(1+t)(1-p)} \quad (26)$$

时, 式(26)取得最大值, 其中  $t = 2^{\frac{H(p)}{1-p}}$ .

对振幅阻尼信道的信道容量与云层厚度、混合粒子在不同混合方式下的粒径比的关系进行仿真, 仿真结果如图 4.

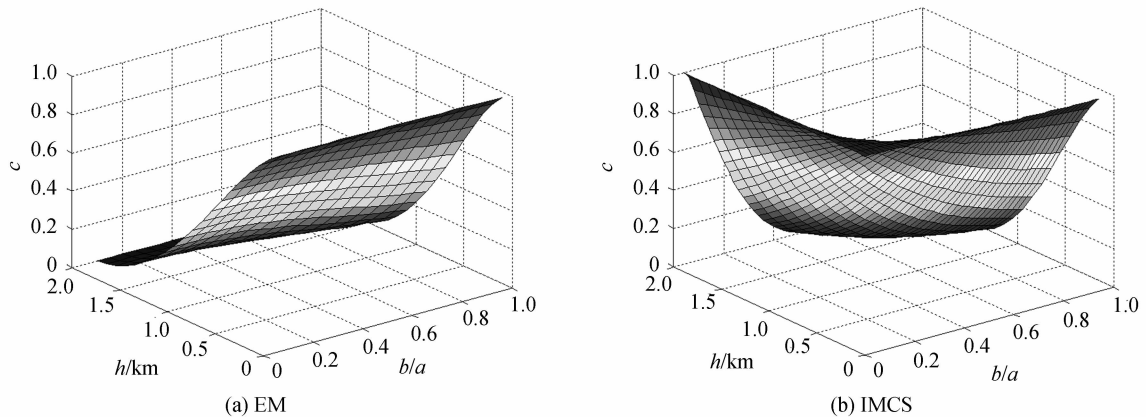


图 4 振幅阻尼信道的信道容量和混合粒子粒径比、云层厚度的关系

Fig. 4 Relationship between channel capacity of the amplitude damping channel and volume ratio, cloud thickness

图4中 $c$ 为信道容量.可以看出,两种混合方式下,由于混合粒子散射的差异性,信道容量随云层厚度的增大有不同幅度的减少.当粒径比和云层厚度都为0时,此时为理想条件,信道容量为最大值.当粒径比为0.5,云层厚度从0.5增加到1.5时,EM中信道容量由0.73减小到0.07;IMCS中信道容量由0.77减小到0.13.当云层厚度为1 km,粒径比由0.4增加到0.9时,EM中信道容量由0.36减小到0.24;IMCS中信道容量由0.52减小到0.16.由此可见,不同混合方式的混合粒子在粒径比一定时,其信道容量随云层厚度的变化衰减幅度不同;云层厚度一定时,粒径比的变化对内混合粒子的信道容量影响较大.

### 2.3 对信道保真度的影响

信道保真度是用来描述信道保持量子系统状态的程度,反映了量子信道有效传输量子态的能力.

定义混合粒子信道的平均保真度<sup>[27]</sup> $F$ 为

$$F(\rho'_1, \rho'_2) = \left[ \text{Tr} \left( \sqrt{\sqrt{\rho'_1} \rho'_2 \sqrt{\rho'_1}} \right) \right]^2 \quad (27)$$

其中,  $\rho'_1$  为目的信息的密度矩阵,即  $\rho'_1 = \begin{bmatrix} 1+p\rho_1-p_1 & 0 \\ 0 & (1-p)\rho_1 \end{bmatrix}$ ,  $\rho'_2$  为待传量子态的密度矩阵.

设进行星地通信时发射的量子态为

$$|\varphi\rangle = \alpha_1 |0\rangle + \beta_1 |1\rangle \quad (28)$$

其中  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  为复数,称为量子态的概率幅,即量子态在进行量子测量时会以  $|\alpha_1|^2$  的概率坍缩到  $|0\rangle$  态,或者以  $|\beta_1|^2$  的概率坍缩到  $|1\rangle$  态.且满足  $|\alpha_1|^2 + |\beta_1|^2 = 1$ .

则  $|\varphi\rangle$  的密度矩阵为

$$\rho'_2 = \begin{bmatrix} |\alpha_1|^2 & \alpha_1 \beta_1^* \\ \alpha_1^* \beta_1 & |\beta_1|^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

令  $\alpha_1 = \beta_1 = 1/\sqrt{2}$ , 则振幅阻尼的平均保真度可以表示为

$$F = \text{Tr} \left\{ \sqrt{\sqrt{\begin{bmatrix} 1+p\rho_1-p_1 & 0 \\ 0 & (1-p)\rho_1 \end{bmatrix}} \times \sqrt{\begin{bmatrix} |\alpha_1|^2 & \alpha_1 \beta_1^* \\ \alpha_1^* \beta_1 & |\beta_1|^2 \end{bmatrix}} \times \sqrt{\sqrt{\begin{bmatrix} 1+p\rho_1-p_1 & 0 \\ 0 & (1-p)\rho_1 \end{bmatrix}} \right\}^2 \quad (30)$$

式中  $p_1$  表示信源输出字符为  $|1\rangle$  的概率.

取云层厚度  $h=1$  km, 对不同混合方式下混合粒子的粒径比、信源字符的概率以及信道的平均保真度进行仿真, 仿真结果如图5.

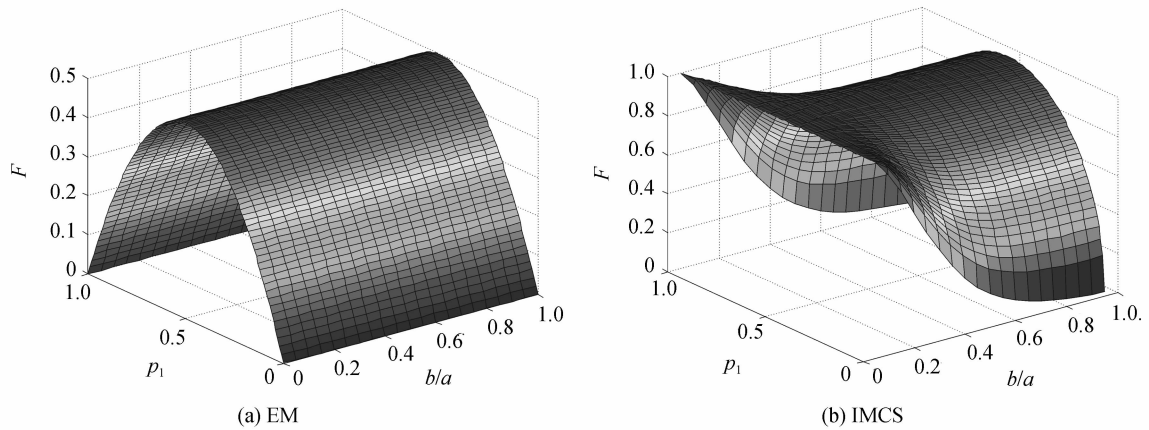


图5 信道平均保真度

Fig. 5 The channel average fidelity

图5中  $p_1$  表示信源输出字符为  $|1\rangle$  的概率,取值范围为  $0 \sim 1$ ;  $F$  表示信道的平均保真度,取值范围为  $0 \sim 1$ .可以看出,当信源字符  $|1\rangle$  的概率为0.5时,两种混合方式的信道平均保真度均达到最大值1,这是由振幅阻尼信道的么正演化所决定的.当混合粒子的粒径比保持不变时,两种混合方式的平均保真度都随着信源字符  $|0\rangle$  的概率在  $0 \sim 0.5$  之间呈指数增长趋势,在  $0.5 \sim 1$  之间呈指数衰减趋势;当信源字符  $|1\rangle$  的概率保持不变时,EM中信道平均保真度不随着混合粒子粒径比的变化而变化;IMCS中信道平均保真度在  $0 < p_0 < 0.2$  和  $0.8 < p_0 < 1$  内会随着混合粒子粒径比的增加急剧减少,在  $0.2 < p_0 < 0.8$  内随着混合粒子粒径比的

增大而逐渐趋于平缓.由此可见,在 IMCS 条件下混合粒子的粒径比越来越大时,即灰霾粒子所占混合粒子的比重越来越多时,混合粒子内的散射与吸收效应越强,对信道的平均保真度的衰减越大.

#### 2.4 对信道误码率的影响

量子误码率  $E_Q$  一般可表示为

$$E_Q = \frac{R_{\text{error}}}{R_{\text{sift}}} \quad (31)$$

基于 BB84 协议的量子密钥分发系统<sup>[7]</sup>,  $R_{\text{error}}$  表示接收到的误码比特率.

$$R_{\text{erro}} = \delta n_0 (1 - \zeta) e^{-4\delta n_0} + \zeta \delta n_0 e^{-\delta G} \quad (32)$$

式中,  $\delta$  为光电探测器量子效率,  $\zeta$  为混合粒子所致去极化效应因子, 取  $\zeta = 1 - 10^{-0.1A_{\text{laf}}}$ ;  $G = e^{-k_{\text{ext}}h} + 4n_0$ ,  $h$  为云层厚度,  $n_0 = n_1/2 + n_2$ ,  $n_1$  为背景噪声引起的光子计数,  $n_2$  为光电探测器的暗电流计数.  $R_{\text{sift}}$  表示总比特率, 为

$$R_{\text{sift}} = F_s R_r (1 - e^{-\gamma T_c P T_a \delta F_c}) \quad (33)$$

式中,  $F_s$  为筛选因子,  $R_r$  为发射脉冲重复率,  $F_c$  为测量因子,  $\gamma$  为脉冲平均光子数,  $T_a$  为系统传输率,  $P$  为单光子俘获率,  $T_c$  为信道传输因子, 可表示为

$$T_c = \left( \frac{E}{E_a} \right)^{\text{secp}} = 10^{-0.1A_{\text{laf}}\varphi} \quad (34)$$

$\varphi$  为地面站到卫星的天顶角.

取云层厚度为 1 km, 采用波长为  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  的光信号进行量子通信, 其余参量取值如表 2 所示.

表 2 信道误码率各参量取值

Table 2 The parameters of channel bit error rate

$\delta$	$n_1$	$n_2$	$T_a$	$F_s$	$R_r$	$\gamma$	$P$
0.65	$10^{-3}$	$10^{-6}$	1	0.5	0.5	1	0.5

对信道误码率与地面到卫星的天顶角和混合粒子的粒径比的关系进行仿真, 仿真结果如图 6 所示.

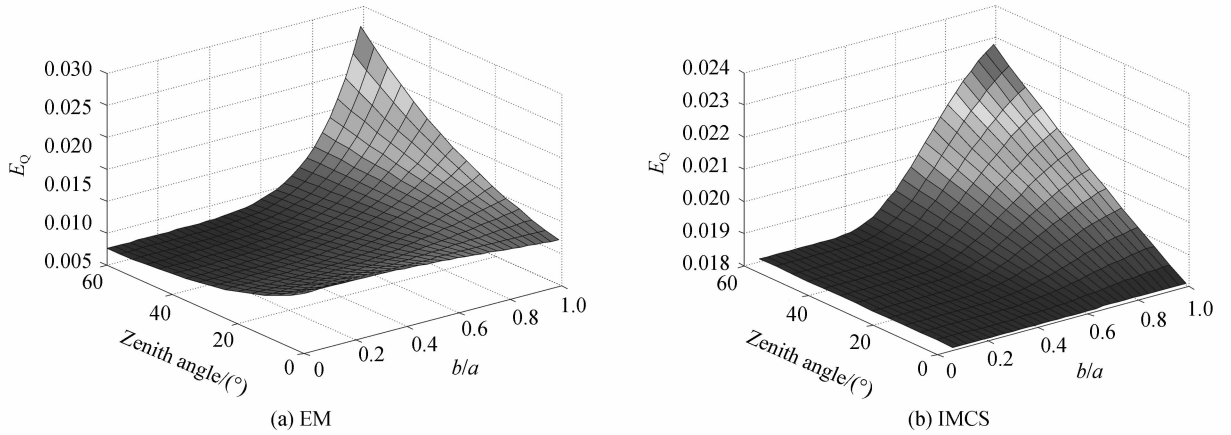


图 6 信道误码率与粒径比和天顶角的关系

Fig. 6 Relationship between channel bit error rate and volume ratio, zenith angle

可以看出,随着混合粒子粒径比和天顶角的增大,量子误码率也在不断增加,EM 和 IMCS 最大分别达到 0.027 和 0.022. 当天顶角一定时,随着粒径比的增大,单位体积内的灰霾粒子的比重增大,对量子光信号的消光作用越明显,则由于量子态的偏振劣化所导致的误码率比例增大,系统总的量子误码率增加. 在相同的混合粒子粒径比和天顶角变化范围内,EM 粒子的信道误码率在 0~0.027 之间变化;而 IMCS 粒子的信道误码率在 0.018~0.022 之间变化. 由此可见,EM 粒子的信道误码率变化幅度较大.

星地量子通信主要使用的编码方式是利用光子的偏振态来编码信息的偏振编码. 当携带编码信息的光子穿过地球大气时,必然受到混合粒子的吸收、散射效应的干扰,从而导致光子偏振劣化. 由仿真结果可得,EM 粒子粒径比的变化对偏振编码的影响较大.

### 3 结论

本文研究了灰霾天气条件下,灰霾粒子和水云粒子的不同混合方式对量子卫星通信性能的影响,根据灰



霾粒子和水云粒子的谱分布函数和不同混合方式下的消光系数,提出了不同混合方式下混合粒子的粒径比与量子卫星通信信道衰减的关系.针对振幅阻尼信道,分析并建立了不同混合方式下混合粒子粒径比对信道容量、信道平均保真度和信道误码率的定量关系,并进行了仿真实验验证.结果表明,随着混合粒子粒径比的增加,量子卫星的链路衰减增大,不同混合方式下的信道容量、信道平均保真度以及信道误码率等性能指标均受到不同程度的影响.因此,在量子卫星通信中,不同粒子的不同混合方式对星地量子通信链路性能所造成的影响不可一概而论.本文所提出的各参量之间的关系可为量子卫星通信提供参考依据,使量子通信系统自适应地调整各项通信参量,以增加量子通信的可靠性.

## 参考文献

- [1] PENG C Z, YANG T, BAO X H, *et al.* Experimental free-space distribution of entangled pairs over 13km: towards satellite-based global quantum communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(15): 150501.
- [2] XU Bing-jie, LIU Wen-lin, MAO Jun-qing, *et al.* Research on development status and existing problems of quantum communication technology[J]. *Communications Technology*, 2014, **47**(5): 463-468.  
徐兵杰, 刘文林, 毛钧庆, 等. 量子通信技术发展现状及面临的问题研究[J]. 通信技术, 2014, **47**(5):463-468.
- [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] VALLONE G, D'AMBROSIO V, SPONSELLI A, *et al.* Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(6): 060503.
- [5] NIE Min, SHANG Peng-gang, YANG Guang, *et al.* Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation[J]. *Acta Physical 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.
- [6] NIE Min, GAO Kun, YANG Guang, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on the performance of free space quantum communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(07): 0701001.  
聂敏, 高锟, 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**(07):0701001.
- [7] YAN Yi, PEI Chang-qing, HAN Bao-bin, *et al.* Study of propagating on Earth-space paths in stratospheric quantum communication system[J]. *Chinese Journal Radio Science*, 2008, **23**(05): 834.  
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**(05):834.
- [8] WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* Aerosol optical properties in the northern suburb of nanjing during haze days in january 2013[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(03): 816.  
王利朋, 马嫣, 郑军, 等. 2013年1月南京北郊霾天气溶胶的光学特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(03):816.
- [9] SALINAS V, CHEW B N, MIETTINEN J, *et al.* Physical and optical characteristics of the October 2010 haze event over Singapore: A photometric and lidar analysis[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**(3): 555-570.
- [10] XU Qiang, WANG Dong-qin, WU Zhen-sen, *et al.* Reeach progress of optical scattering transmission properties of haze and other high concentration of atmospheric aerosol[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, **10**(6): 437-444.  
徐强, 王东琴, 吴振森. 大气灰霾高浓度气溶胶光学散射传输特性研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2015, **10**(6): 437-444.
- [11] HUANG Hong-lian, HUANG Yin-bo, HAN Yong, *et al.* Light extinction properties of marine aerosol partieles in internal mixing state [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 179 .  
黄红莲, 黄印博, 韩勇, 等. 内混合海洋型气溶胶粒子消光特性的分[J]. 大气与环境光学学, 2007, **2**(3):179.
- [12] RANGLES C A, RUSSELL L M, RAMASWAMY V. Hygroscopic and optical properties of organic sea salt aerosol and consequences for climate forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(16): 309-33
- [13] LESINS G, CHYLEK P, LOHMANN U. A study of internal and external mixing scenarios and its effect on aerosol optical properties and direct radiative forcing[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, **107**(D10): AAC 5-1-AAC 5-12.
- [14] ACKERMAN T P, TOON O B. Absorption of visible radiation in atmosphere containing mixtures of absorbing and nonabsorbing particles [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(20): 3661.
- [15] LEVONI C, CERVINO M, GUZZI R, *et al.* Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(30): 8031-8041.
- [16] WANG Hai-hua, SUN Xian-ming. Multiple scattering of light by mixtures of two different aerosol types[J]. *Acta Physical Sinica*, 2012, **61**(15): 154204.  
王海华, 孙贤明. 两种按比例混合颗粒系的多次散射模拟[J]. 物理学报, 2012, **61**(15):154204.
- [17] ZHANG Xiao-lin, HUANG Yin-bo, RAO Rui-zhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(06): 0629001.  
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性[J]. 光学学报, 2012, **32**(06): 0629001.

- [18] PÓSFAL M, ANDERSON J R, BUSECK P R, *et al.* Soot and sulfate aerosol particles in the remote marine troposphere [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, **104**(D17): 21685-21693.
- [19] SUN Tian-le, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, *et al.* Characteristics of the size distribution and mixing state of black carbon aerosol in Shenzhen in winter[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(21): 1703-1710.  
孙天乐, 何凌燕, 黄晓峰, 等. 深圳市冬季黑碳气溶胶的粒径分布和混合态特征[J]. 科学通报, 2011, **56**(21):1703-1710.
- [20] 魏邦海. 气溶胶与冰水两相粒子的散射特性[D]. 南京:南京信息工程大学, 2015:17-27.
- [21] 王小东. 水云及卷云辐射特性参量化[D]. 成都:电子科技大学, 2006:17-22.
- [22] YAO Qing, HAN Su-mei, BI Xiao-hui. Main components and extinction characteristic of aerosol during March 2009 at Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(2): 214-220.  
姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津 2009 年 3 月气溶胶化学组成及其消光特性研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2):214-220.
- [23] FENN R W, OSER H. Scattering properties of concentric soot-water spheres for visible and infrared light[J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(11).
- [24] LANZAGORTA M. 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.
- [25] YANG Guang, LIAN Bao-wang, NIE Min. Characteristics of multi-hop noisy quantum entanglement channel and optimal relay protocol[J]. *Acta Physical Sinica*, 2015, **64**(24): 240304.  
杨光, 廉保旺, 聂敏. 多跳噪声量子纠缠信道特性及最佳中继协议[J]. 物理学报, 2015, **64**(24):240304.
- [26] 张永德. 2005. 量子信息物理原理[M]. 北京:科学出版社, 2005: 125-151.
- [27] 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: 49-53.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61172071), the Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province (No. 2014JQ8318 ) and the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province (No. 2015KW-013 ), Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (No. 16JK1711)