

# 激光与光电子学进展

## 冰云对量子卫星通信性能的影响

郭建伟<sup>1\*</sup>, 聂敏<sup>1</sup>, 杨光<sup>1,2</sup>, 张美玲<sup>1</sup>, 孙爱晶<sup>1</sup>, 裴昌幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

<sup>2</sup>西北工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710072;

<sup>3</sup>西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 冰云由微小的冰晶粒子组成,一般出现在 6 km 以上的高空,冰晶粒子和光量子信号相互作用会对量子卫星通信链路造成严重影响。为了研究冰晶粒子对量子卫星通信性能的影响,首先,根据冰云光散射模型和米散射理论,定义了冰云内冰晶粒子的平均消光系数,并建立了链路衰减系数、冰云冰水含量(IWC)和量子信号在冰云内传输距离的关系;然后,针对振幅阻尼信道,建立了信道容量、信道平均保真度、信道生存函数、信道误码率和冰云 IWC 以及量子信号在冰云内传输距离的关系。理论分析和仿真实验结果表明,当量子信号在冰云内的传输距离为 20 km 时,随着冰云 IWC 的增加,链路衰减因子从 4.6 dB 增加到 14.7 dB,量子信道容量由 0.250 bit/s 减小到 0.089 bit/s,信道平均保真度也急剧降低,生存函数值由 1.00 减少到 0.58,量子信道误码率从 0.015 增大到 0.075。这表明冰云内的冰晶粒子对量子卫星的通信质量有明显影响,为了提高量子卫星通信系统的可靠性,需根据冰云的相关参数,自适应调整量子卫星通信系统的参数。

**关键词** 量子光学; 冰云; 冰水含量; 振幅阻尼信道; 信道生存函数

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0506005

## Influence of Ice Cloud on Performance of Quantum Satellite Communication

Guo Jianwei<sup>1\*</sup>, Nie Min<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1,2</sup>, Zhang Meiling<sup>1</sup>, Sun Aijing<sup>1</sup>, Pei Changxing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

<sup>2</sup>School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** Ice cloud is composed of tiny ice crystal particles, which generally appear at an altitude of more than 6 km. The interaction between ice crystal particles and light quantum signals will seriously affect the quantum satellite communication link. To study the influence of the ice crystal particles on the performance of quantum satellite communication, in this paper, first, according to the ice cloud light scattering model and the Mie scattering theory, the average extinction coefficient of the ice particles in the ice cloud is defined, and relationship between the link attenuation coefficient, ice cloud ice water content (IWC) and the transmission distance of quantum signal in the ice cloud are established; then, for the amplitude damping channel, the relationship between channel capacity, channel average fidelity, channel survival function, channel error rate and ice cloud IWC and the transmission distance of quantum signal in ice cloud are established. Theoretical analysis and simulation results show that when the

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61971348,61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划(2015KW-013)、陕西省教育厅科研计划(16JK1711)

\*E-mail: 15539979017@163.com

transmission distance of quantum signal in ice cloud is 20 km, with the increase of ice cloud IWC, the link attenuation factor increases from 4.6 dB to 14.7 dB, the quantum channel capacity decreases from 0.250 bit/s to 0.089 bit/s, the average channel fidelity decreases sharply, the survival function decreases from 1.00 to 0.58, and the quantum channel error rate increases from 0.015 to 0.075. This shows that the ice crystal particles in the ice cloud have a significant impact on the communication quality of the quantum satellite. In order to improve the reliability of the quantum satellite communication system, the parameters of the quantum satellite communication system should be adjusted adaptively according to the relevant parameters of the ice cloud.

**Key words** quantum optics; ice cloud; ice water content; amplitude damping channel; channel survival function

**OCIS codes** 060.5565; 010.2940; 060.4510

## 1 引言

量子卫星通信是在自由空间量子通信研究的基础上提出以量子卫星作为中转平台建设全球量子通信网络。经过长期不懈的努力,2016年8月,彭承志等<sup>[1]</sup>成功实施了“墨子号”量子卫星的发射,使全球量子通信网络的构建成为可能,也加速了我国构建全球量子通信网络的步伐。

量子态信息在自由空间中传输时,量子态会受到环境因素的干扰,导致通信性能下降甚至中断。为了研究环境因素对量子通信系统的影响,刘涛等<sup>[2]</sup>分析了降雨、降雪和雾霾三种常见天气对自由空间量子通信系统的影响。刘邦宇等<sup>[3]</sup>分析了煤烟凝聚粒子的消光效应,并研究了煤烟凝聚粒子对量子通信链路、信道容量、信道保真度、信道误码率的影响。张秀再等<sup>[4]</sup>研究了雾的消光系数对量子卫星通信信道参数的影响。任杰等<sup>[5]</sup>探讨了自然环境中多种因素对自由空间量子通信性能的影响。聂敏等<sup>[6]</sup>研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响,并进行了仿真分析。聂敏等<sup>[7]</sup>研究了PM<sub>2.5</sub>指数对量子卫星通信信道的影响,为量子卫星在不同污染指数下调整通信参数提供了依据。聂敏等<sup>[8]</sup>分析了冰水混合物对量子卫星信道容量、信道保真度以及信道误码率的影响。王涵等<sup>[9]</sup>研究了降雨和雾天天气下自由空间光通信的性能。聂敏等<sup>[10]</sup>分析了灰霾粒子和水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能的影响。聂敏等<sup>[11]</sup>分析了雷暴云对星地量子卫星通信链路的影响,并进行了参数仿真。贾娜等<sup>[12]</sup>研究了宇宙微波背景辐射对量子卫星信道性能和纠缠储备量的影响。聂敏等<sup>[13]</sup>分析了中纬度地区电离层偶发E层对量子卫星信道性能的影响。量子信息在星地链路进行传输时,不可避免地会穿过冰云层,冰云内的冰晶粒子和光量子信号会发生相互作用,产生消光效应。

李娟等<sup>[14-16]</sup>用不同的方法研究了冰晶颗粒的光散射效应,并在冰晶粒子模型基础上剖析了冰晶粒子的光散射特性。

目前,还未展开冰云对量子卫星通信系统的研究。本文在上述研究的基础上,首先,分析了冰云内冰晶粒子对量子卫星通信链路、信道容量、信道保真度、信道生存函数、信道误码率等参数的影响。然后,根据冰云内冰晶粒子的谱分布函数,结合米散射理论分析了星地通信链路衰减系数与光量子传输距离以及冰云冰水含量(IWC)之间的关系,并研究了冰云内振幅阻尼信道容量、信道平均保真度、信道生存函数、信道误码率与传输距离和冰云IWC之间的关系。最后,进行了仿真实验,结果表明,该研究可为量子卫星通信系统的健康发展奠定理论研究基础,也为天地一体化量子卫星通信系统的建设提供了理论依据。

## 2 冰云内的冰晶粒子对量子卫星通信链路的影响

图1为量子卫星星地链路传输示意图,其中,A为量子卫星,B为冰云,冰云主要出现在6 km以上的高空,C和D分别为发送方Alice和接收方Bob。量子态信息在传输过程中遭遇冰云后,A、C和A、D之间的量子链路传输性能会受到冰晶粒子的影响。

冰云中冰晶粒子的形态一般为非球形结构,要研究冰云中冰晶粒子的光散射特性,就要建立合理的冰晶模型,越接近实际冰晶粒子的模型,计算出的光散射特性系数也就越准确<sup>[17-19]</sup>。由于冰晶粒子的形状差异,冰晶粒子的光散射模型有很多种。文献[20-22]分别研究了不同的冰晶粒子光散射模型,并总结了各种模型的优劣,但由于冰云的复杂性和多变性,仍需建立更精确的冰晶粒

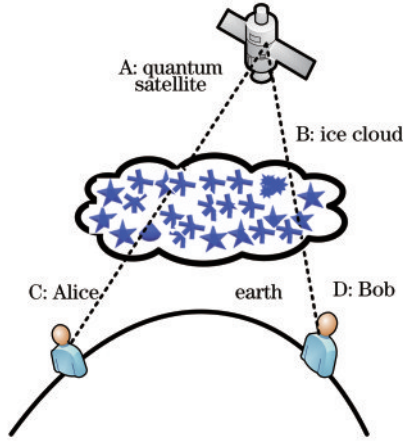


图 1 量子卫星地链路传输的示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the quantum satellite satellite-to-earth link transmission

子尺寸分布模型。实验在 MODISC6 冰云光散射模型<sup>[20,22]</sup>的基础上,假设冰云由聚合物冰晶粒子组成,考虑冰云的 IWC,并结合单个冰晶粒子的米散射消光系数,将冰云内冰晶粒子的平均消光系数定义为

$$A_{\text{ext}} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} A(D) N(D) Q_{\text{ext}}(D) dD}{X_{\text{IWC}}}, \quad (1)$$

式中,  $A(D)$  为冰晶粒子的投影面积,  $N(D)$  为冰晶粒子的谱分布函数,  $D$  为冰云内冰晶粒子的尺寸,  $D_{\min}$  和  $D_{\max}$  分别为冰云内冰晶粒子尺寸的下限和上限,  $Q_{\text{ext}}(D)$  为冰晶粒子的消光效率因子,  $X_{\text{IWC}}$  为冰云的冰水含量。其中,  $D_{\min} = 18 \mu\text{m}$ ,  $D_{\max} = 334 \mu\text{m}$ 。根据文献[23],可将非球形粒子的消光效率定义为

$$\begin{aligned} Q_{\text{ext}}(D) &= Q_{\text{ext}}(\rho_e, \beta, \alpha) \\ &= 2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} l_m m_i\right) \times \cos\left(-\frac{2\pi}{\lambda} l_m |m_r - 1| + \alpha_e\right) \right] \\ &= 2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{V}{A} m_i\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{V}{A} |m_r - 1| + \alpha_e\right) \right], \\ &= 2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2}{3} \rho_e \tan \beta\right) \cos\left(\frac{2}{3} \rho_e + \alpha_e\right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $V$  为非球形冰晶粒子的体积,  $A$  为投影面积,  $l_m$  为光子通过冰晶粒子的几何路径,  $\rho_e = 2\pi d_e |m_r - 1|/\lambda$  为有效的相位延迟,  $d_e = 2D$  为非球形冰晶粒子的有效尺寸,  $\lambda$  为光量子信号的波长,  $\beta = \arctan[m_i/(m_r - 1)]$  为光的相移。  $m_r, m_i$  分别为冰云粒子平均复折率的实部和虚部,  $m_r = 1.285$ ,  $m_i = 1.85 \times 10^{-5}$ , 参数  $\alpha_e$  为非球面度对平均相位的偏移,  $X_{\text{IWC}}$  可表示为

$$X_{\text{IWC}} = \rho_{\text{ice}} N \cdot V = \rho_{\text{ice}} \sum_{h=1}^M \left[ \int_0^{\infty} V_h(D) f_h(D) N_h(D) dD \right], \quad (3)$$

$$\sum_{h=1}^M f_h(D) = 1, \quad (4)$$

式中,  $N$  为冰粒子的数密度,  $\rho_{\text{ice}} = 0.916 \text{ g/cm}^3$  为冰晶粒子的密度,  $V_h(D), N_h(D)$  分别为第  $h$  类冰晶粒子的体积和谱分布函数,  $M$  为冰晶粒子的种类。假设冰云为单一类的冰晶粒子,则可将(3)式简化为

$$X_{\text{IWC}} = \rho_{\text{ice}} \int_0^{\infty} V(D) N(D) dD. \quad (5)$$

表 1 为不同冰云模型的物理性质和相关参数。根据文献[24]可知,冰云内冰晶粒子的谱分布函数  $N(D)$  可表示为

表 1 不同冰云模型的微物理性质

Table 1 Microphysical properties of different ice cloud models

Ice cloud model	$X_{\text{IWC}}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Particle number concentration/ $(\text{m}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1})$				
		$D=20 \mu\text{m}$	$D=50 \mu\text{m}$	$D=120 \mu\text{m}$	$D=300 \mu\text{m}$	$D=750 \mu\text{m}$
Cold Ci	$0.352 \times 10^{-3}$	8600	75.16	0.8367	0.05867	0.00399
Warm Ci	$0.454 \times 10^{-2}$	20050	702.8	36.94	4.807	0.1414
Ci at $-60^\circ$	$0.231 \times 10^{-3}$	3034	86.38	2.877	0.0817	0.0023
Ciuncinus	$0.172 \times 10^{-1}$	5710	1280	129.4	41.10	5.976
Cs	$0.183 \times 10^{-2}$	6700	975.8	32.43	1.497	0.000

$$N(D) = \chi \times D^{(1-3v_{\text{eff}})/v_{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{D}{R_{\text{eff}}v_{\text{eff}}}\right), \quad (6)$$

式中,  $\chi = 2.373$  为归一化常量,  $R_{\text{eff}}$  为冰晶粒子的有效半径,  $v_{\text{eff}}$  为有效方差,  $D$  的取值范围为  $18 \sim 334 \mu\text{m}$ 。

当量子态信息在星地链路传输时, 冰云中冰晶粒子和光量子信号相互作用产生的消光效应会导致量子态振幅衰减<sup>[25]</sup>, 可表示为

$$I = I_0 \exp(-A_{\text{ext}} \cdot L), \quad (7)$$

式中,  $I_0$  为量子态的初始振幅,  $I$  为量子态传输距离  $L$  后的振幅。

根据衰减系数的定义, 得到冰云中冰晶粒子与量子卫星和地面链路衰减因子的对数表达形式为

$$K_{\text{loss}} = 10 \lg \frac{I_0}{I} = 10 A_{\text{ext}} L \lg e. \quad (8)$$

假设光量子信号的波长  $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$ , 冰云内冰晶粒子在不同 IWC 下, 链路衰减因子与信号在冰云内传输距离的关系如图 2 所示。可以发现, 当冰云的 IWC 一定时, 光量子信号在冰云中的传输距离  $L$  越大, 其在冰云内和冰晶粒子的碰撞次数也就越多, 链路衰减系数呈上升趋势, 且衰减系数因子在  $L = 30 \text{ km}$  和  $X_{\text{IWC}} = 1 \text{ g/m}^3$  处取最大值。当  $X_{\text{IWC}} = 0.4 \text{ g/m}^3$ , 传输距离从  $2 \text{ km}$  增加到  $15 \text{ km}$  时, 链路衰减因子从  $2.3 \text{ dB/km}$  增加到  $8.7 \text{ dB/km}$ ; 当冰云内传输距离为  $20 \text{ km}$ ,  $X_{\text{IWC}}$  从  $0.2 \text{ g/m}^3$  增加到  $0.8 \text{ g/m}^3$  时, 链路衰减因子从  $4.6 \text{ dB/km}$  增加到  $14.7 \text{ dB/km}$ 。这表明冰云内的冰水含量和传输距离会影响链路的衰减, 严重影响量子卫星的通信质量。可以通过增加量子脉冲强度、耦合强度等参数, 降低通信链路的衰减, 提高通信质量。

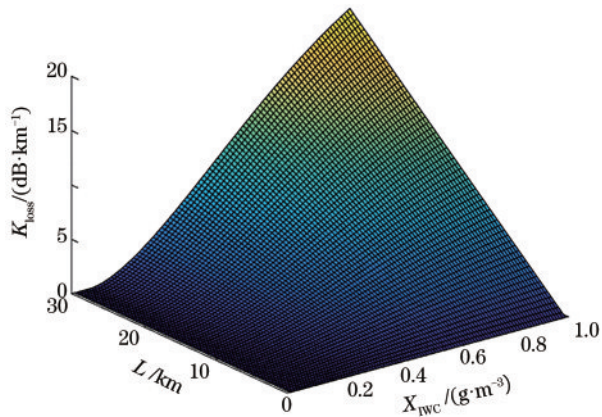


图 2 衰减系数与传输距离、 $X_{\text{IWC}}$  的关系

Fig. 2 Relationship between attenuation coefficient and transmission distance,  $X_{\text{IWC}}$

### 3 冰云内的冰晶粒子对量子卫星通信性能的影响

#### 3.1 冰云内冰晶粒子对振幅阻尼信道容量的影响

量子卫星通过大气通道将光量子发送到地面, 光量子会和冰云内的冰晶粒子相互作用, 导致光量子信号的退相干。假设冰云内冰晶粒子环境的初始状态为  $|e_{\text{iceB}}\rangle$ , 经过一段时间后, 量子位将以概率  $p$  从  $|1\rangle_{\text{S}}$  态转移到  $|0\rangle_{\text{S}}$  态, 冰晶粒子的环境态将以概率  $p$  转移到  $|e_{\text{iceE}}\rangle$ , 该过程会影响量子位和冰云中冰晶粒子环境态混合系统  $U_{\text{SE}}$  的酉演化<sup>[26]</sup>, 可表示为

$$U_{\text{SE}} \begin{cases} |0\rangle_{\text{S}} |e_{\text{iceS}}\rangle \rightarrow |0\rangle_{\text{S}} |e_{\text{iceS}}\rangle \\ |1\rangle_{\text{S}} \rightarrow \sqrt{1-p} |1\rangle_{\text{S}} |e_{\text{iceS}}\rangle + \sqrt{p} |0\rangle_{\text{S}} |e_{\text{iceE}}\rangle \end{cases} \quad (9)$$

根据文献[27]可进一步得到混合系统的演化状态  $U(|\varphi_{\text{A}}\rangle |e_{\text{iceS}}\rangle)$

$$U(|\varphi_{\text{A}}\rangle |e_{\text{iceS}}\rangle) = (\xi |0\rangle_{\text{S}} + \sqrt{1-p} \eta |1\rangle_{\text{S}}) |e_{\text{iceS}}\rangle + \sqrt{p} |0\rangle_{\text{S}} |e_{\text{iceE}}\rangle, \quad (10)$$

式中,  $|\varphi_{\text{A}}\rangle$  为量子位态,  $\xi$  和  $\eta$  为复数, 且满足  $|\xi|^2 + |\eta|^2 = 1$ 。

对冰晶粒子的环境态求偏迹, 得到超算符  $\mathcal{S}$  的两个 Kraus 算子  $O_0$  和  $O_1$  为

$$O_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{bmatrix}, \quad O_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$p = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \exp(A_{\text{ext}} \cdot L), \quad (12)$$

量子系统 S 的初始化密度矩阵  $\rho_{\text{S}}$  可表示为

$$\rho_{\text{S}} = \begin{bmatrix} w_{00} & w_{01} \\ w_{10} & w_{11} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

经过一段时间后会演化为<sup>[26]</sup>

$$\rho_{\text{S}} \rightarrow \epsilon(\rho_{\text{S}}) \equiv \mathcal{S}(\rho_{\text{S}}) = O_0 \rho_{\text{S}} O_0^\dagger + O_1 \rho_{\text{S}} O_1^\dagger = \begin{bmatrix} w_{00} + p w_{11} \sqrt{1-p} & w_{01} \\ \sqrt{1-p} w_{10} & (1-p) w_{11} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中,  $\epsilon(\rho_{\text{S}})$  为在冰晶粒子作用下系统初始化密度矩阵演化得到的新矩阵,  $O_0^\dagger$  和  $O_1^\dagger$  分别为矩阵  $O_0$  和  $O_1$  的逆矩阵, 超算符  $\mathcal{S}$  为一个映射, 表示量子通信系统 S 与冰云内的冰晶粒子相互作用演化后的对应关系。

假设振幅阻尼信道的容量为  $C$ , 地面向量子卫星发送的信源为  $\{p_j, \rho_j\}$ 。其中,  $j$  为发送量子字符



的序号,发送量子字符  $\rho_j$  的概率为  $p_j$ ,且  $\sum p_j = 1$ ,如果输入的字符  $\rho_0 = |0\rangle\langle 0|$ ,  $\rho_1 = |1\rangle\langle 1|$ ,  $p_0$  和  $p_1$  分别为发送两个字符的概率。通过和冰云中冰晶粒子发生碰撞,初始的量子态会逐渐演化为

$$\rho_s \rightarrow \epsilon(\rho_s) \equiv \mathcal{E}(\rho_s) = \begin{bmatrix} p_0 + pp_1 & 0 \\ 0 & (1-p)p_1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

相应的冯诺依曼熵为

$$R[\epsilon(\rho_s)] = -(p_0 + pp_1) \log(p_0 + pp_1) - (1-p)p_1 \log[(1-p)p_1]. \quad (16)$$

量子卫星收到地面发送的字符熵  $R(\rho_j)$  为

$$R(\rho_j) = p_1[-p \log p - (1-p) \log(1-p)] = p_1 H(p), \quad (17)$$

式中,  $H(p)$  为二元熵。振幅阻尼量子信道的最大信道容量为

$$C = \max \left\{ R[\epsilon(\rho_s)] - \sum_j p_j R(\rho_j) \right\} = \max \left\{ -(p_0 + pp_1) \log(p_0 + pp_1) - (1-p)p_1 \log[(1-p)p_1] - p_1 H(p) \right\}, \quad (18)$$

对(18)式进行求导,得到

$$p_0 = \frac{\gamma(1-p) - p}{(1+\gamma)(1-p)}, \quad (19)$$

式中,  $\gamma = \frac{H(p)}{1-p}$ ,  $p_0 = 1 - p_1$ 。(19)式成立时,振幅阻尼信道容量  $C$  取最大值。对振幅阻尼量子信道的信道容量与信号在冰云内的传输距离、 $X_{IWC}$  的关系进行仿真,结果如图 3 所示。可以发现,当传输距离为 0 km,  $X_{IWC} = 0 \text{ g/m}^3$  时(理想状态),振幅阻尼信道的容量取最大值,随着传输距离和  $X_{IWC}$  的增加,信道容量逐渐减小。当  $X_{IWC} = 1.2 \text{ g/m}^3$ , 传输距离从 5 km 增加到 20 km 时,信道容量由 0.790 bit/s 减小到 0.170 bit/s; 当传输距离为 20 km,  $X_{IWC}$  从 1.2  $\text{g/m}^3$  增加到 1.8  $\text{g/m}^3$  时,信道容量由 0.250 bit/s 减小到 0.089 bit/s。这表明随着冰云  $X_{IWC}$  和传输距离的增加,振幅阻尼量子信道的信道容量会减小,因此,可根据冰云内冰晶粒子的  $X_{IWC}$  增加信道带宽或增大发射端量子信号的发射功率,

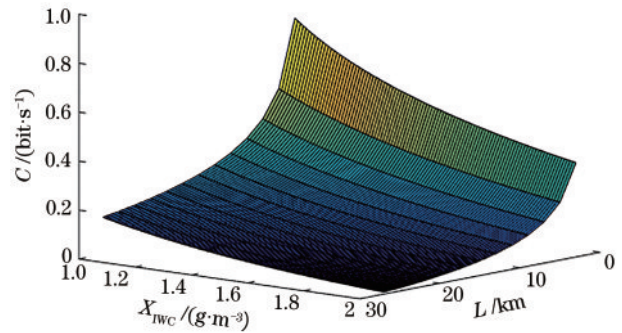


图 3 信道容量与传输距离、 $X_{IWC}$  的关系

Fig. 3 Relationship between channel capacity, transmission distance, and  $X_{IWC}$

以改善量子通信的传输性能。

### 3.2 冰云内的冰晶粒子对量子信道保真度的影响

信道的保真度可用来描述信道对量子系统的保持程度,也是衡量量子信道有效传输量子态信息的重要指标<sup>[27]</sup>。在冰云中冰晶粒子的作用下,可将星地链路信道的平均保真度  $F$  表示为

$$F \left[ \sum_i p_i \rho_i, \epsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \right] = \text{tr} \sqrt{\left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{\frac{1}{2}} \epsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (20)$$

式中,  $p_i$  为接收字符  $\rho_i$  的概率,  $\text{tr}$  为矩阵的迹,  $i$  为接收量子字符的序号。对于振幅阻尼信道来说,星地链路信道的平均保真度为

$$F = \sqrt{p_1[p_1 + (1-p_1)p]} + (1-p_1)\sqrt{1-p}, \quad (21)$$

式中,  $p_1$  为信源输出字符  $|1\rangle$  的概率,  $1 - p_1$  为输出字符  $|0\rangle$  的概率。

假设量子信息传输穿过冰云的距离为 20 km,

对冰云内不同的  $X_{IWC}$ 、信源字符概率以及信道保真度进行仿真,结果如图 4 所示。可以发现,信道平均保真度的最大值为 1,原因是振幅阻尼信道的么正演化。在  $0 \leq p \leq 0.4$  和  $0.65 \leq p \leq 1$  时,信道平均保真度会随  $X_{IWC}$  的增加急剧减少。在  $0.4 \leq p \leq 0.65$  时,随  $X_{IWC}$  的增加,信道平均保真度的降低趋势比较平缓。这表明冰云  $X_{IWC}$  越大,对光量子信号传输的影响越大,信道平均保真度的衰减也就越

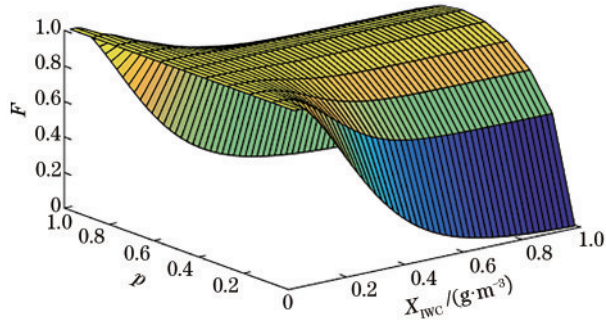


图 4 信道的平均保真度

Fig. 4 Average fidelity of the channel

大。可在发送端调整脉冲平均光子数提高信道保真度,从而提高量子态信息传输的成功率。

### 3.3 冰云内的冰晶粒子对量子卫星通信链路生存函数的影响

为了评估量子卫星的抗干扰和生存性能,研究了冰云中冰晶粒子对量子卫星与地面用户通信的影响。文献[28]指出,在冰云中冰晶粒子与量子信号的相互作用下,振幅阻尼信道的生存函数可表示为

$$B = \xi F, \quad (22)$$

式中,  $\xi$  为生存系数,其与振幅阻尼信道所处的环境有关,可表示为<sup>[29]</sup>

$$\xi = \frac{5809}{5810} - \frac{9}{2905} \times A_{\text{ext}}. \quad (23)$$

结合(1)式和(21)式,得到冰云中冰晶粒子影响下振幅阻尼信道的生存函数为

$$B = \xi F = \left( \frac{5809}{5810} - \frac{9}{2905} \times A_{\text{ext}} \right) \times \left\{ \sqrt{p_1 [p_1 + (1-p_1)p]} + (1-p_1)\sqrt{1-p} \right\}. \quad (24)$$

在光量子信号和冰云中冰晶粒子相互作用的环境中,假设冰云的  $X_{\text{IWC}}$  不变,对生存函数、信源字符概率和传输距离进行仿真,结果如图 5 所示。可

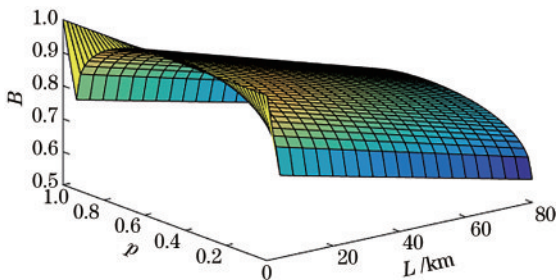


图 5 信道生存函数与信源字符概率、传输距离之间的关系

Fig. 5 Relationship between channel survival function and source character probability, transmission distance

以发现,随着传输距离的增加,生存函数呈下降趋势。当信源输出字符的概率为 0.5,光量子信号在冰云内的传输距离从 0 km 增加到 70 km 时,生存函数由 1.00 减少到 0.58。这表明冰云内的冰晶粒子环境会严重影响量子卫星通信链路的生存性,可通过增加量子的耦合强度、失谐量或调整发射端脉冲的平均光子数,提高量子态信息的保真度,从而增强量子态信息的生存性。

### 3.4 冰云内的冰晶粒子对量子卫星信道误码率的影响

量子卫星的通信误码率主要受光学元件、探测器暗噪声和信道的影响,因此,研究通信误码率时,仅考虑冰云内冰晶粒子对信道误码率的影响,量子误码率可表示为<sup>[30]</sup>

$$Q_{\text{BER}} = \frac{Q_{\text{error}}}{Q_{\text{sift}}}, \quad (25)$$

式中,  $Q_{\text{error}}$  为接收到的误码比特率,  $Q_{\text{sift}}$  为接收到的总比特率。由文献[30]可知

$$Q_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \times \frac{X_{\text{IWC}} \cdot \tau n}{1 - \exp(-\mu T_s P_e \zeta \eta_d f)}, \quad (26)$$

式中,  $\tau$  为量子探测器的时间窗口,  $n$  为探测器的数目,  $\mu$  为平均光子数,  $P_e$  为光子捕获率,  $T_s$  为系统的传输率,  $\eta_d$  为单光子探测器的探测效率,  $f$  为探测因子,  $\zeta$  为光量子信号经过冰云的传输率,可表示为

$$\zeta = \exp(-A_{\text{ext}} \cdot L). \quad (27)$$

假设光信号的波长  $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$ , 其余参数设置如表 2 所示。根据表 2 中的参数,对信道误码率、 $X_{\text{IWC}}$  及传输距离进行仿真,结果如图 6 所示。可以发现,量子误码率随  $X_{\text{IWC}}$  和距离的增大而增大,当传输距离一定时,  $X_{\text{IWC}}$  越大,光量子信号的衰减就越大,误码率也会随之增加;当  $X_{\text{IWC}}$  一定时,随着传输距离的增加,光量子信号和冰云内的冰晶粒子发生碰撞的概率增大,量子比特发生错误的概率也就越大;当传输距离  $L = 20 \text{ km}$ ,  $X_{\text{IWC}}$  从  $0 \text{ g/m}^3$  增加到  $0.5 \text{ g/m}^3$  时,量子信道的误码率从 0.020 增大到 0.035;当  $X_{\text{IWC}} = 0.5 \text{ g/m}^3$ , 传输距离从 20 km 增加到 50 km 时,量子信道的误码率从 0.015 增大到 0.075。这表明冰云内的冰晶粒子会严重影响量子通信的质量,因此,需要实时根据冰水含量和光量

表 2 各参数的取值

Table 2 Value of each parameter

$\tau/\text{ns}$	$n$	$\mu$	$P_e$	$T_s$	$\eta_d$	$f$
1	1	1	0.5	1	0.65	1

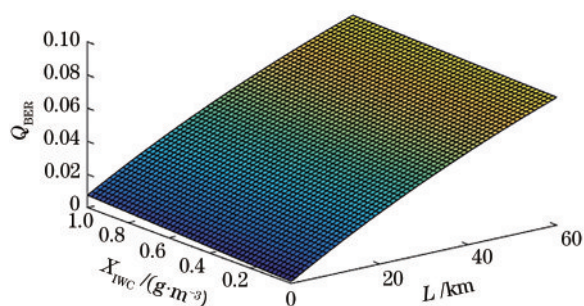


图 6 信道误码率、 $X_{1WC}$  以及传输距离的关系

Fig. 6 Relationship between channel error rate,  $X_{1WC}$  and transmission distance

子信号在冰云内的传输距离调整量子通信系统的通信带宽、发射功率、量子耦合度等参数,降低量子信道的误码率,提高量子态信息传输的可靠性。

## 4 结 论

主要研究了光量子信号在星地链路传输穿过冰云时,冰晶粒子对量子卫星通信性能的影响。根据冰云内冰晶粒子的谱分布函数及消光特性,得到了衰减系数和冰水含量及传输距离的关系。针对振幅阻尼信道,分析了冰云内的冰晶粒子对信道容量、信道平均保真度、信道生存函数和信道误码率的影响。仿真实验结果表明,随着冰云内冰晶粒子相关系数的变化,量子卫星通信系统的各项指标均受到不同程度的影响。这表明冰云内的冰晶粒子对量子卫星通信性能的影响不能忽略,要根据冰云的实时参数,自适应调整量子卫星通信系统的通信带宽、发射功率、量子耦合度、量子失谐量以及脉冲的平均光子数等相关参数,降低冰云内冰晶粒子对量子卫星通信系统的影响,保证量子卫星通信系统的正常运行。

## 参 考 文 献

- [1] Peng C Z, Pan J W. Quantum science experimental satellite "Micius"[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(9): 1096-1104.  
彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星: "墨子号"[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1096-1104.
- [2] Liu T, Zhu C, Sun C Y, et al. Influences of different weather conditions on performance of free-space quantum communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0227001.  
刘涛, 朱聪, 孙春阳, 等. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0227001.
- [3] Liu B Y, Zhang X Z, Xu X. Influence of soot agglomerated particles on quantum satellite communication performance [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0327001.  
刘邦宇, 张秀再, 徐茜. 煤烟凝聚粒子对量子卫星通信性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0327001.
- [4] Zhang X Z, Xu X, Liu B Y. Influence of fog on performance of free-space quantum communication [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0727001.  
张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 雾对自由空间量子通信性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0727001.
- [5] Ren J, Nie M, Yang G, et al. Influences of multiple factors of natural environment on the performance of free space quantum communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(12): 1227003.  
任杰, 聂敏, 杨光, 等. 自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响[J]. 光子学报, 2015, 44(12): 1227003.
- [6] Nie M, Shang P G, Yang G, 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.
- [7] Nie M, Ren J, Yang G, et al. Influences of PM2.5 atmospheric pollution on the performance of free space quantum communication[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 150301.  
聂敏, 任杰, 杨光, 等. PM2.5 大气污染对自由空间量子通信性能的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 150301.
- [8] Nie M, Ren J M, Yang G, et al. Influences of the ice-water mixed clouds on the performance of quantum satellite communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0927004.  
聂敏, 任家明, 杨光, 等. 冰水混合云对量子卫星通信性能的影响[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0927004.
- [9] Wang H, Zhang T. Analysis of performance for free-space optical communications with rain or fog weather condition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080101.  
王涵, 张涛. 降雨和雾气天气下自由空间光通信性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080101.
- [10] Nie M, Chang L, Yang G, et al. Influence of



- different mixing patterns of haze particles and water cloud particles on the performance of quantum satellite communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0701002.
- 聂敏, 常乐, 杨光, 等. 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[J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0701002.
- [11] Nie M, Shi L, Yang G, et al. Influence of thunderstorm cloud on the performance of satellite-to-ground quantum link and parameters simulation [J]. *Journal on Communications*, 2017, 38 (5) : 31-38.
- 聂敏, 石力, 杨光, 等. 雷暴云对星地量子链路性能的影响及参数仿真[J]. *通信学报*, 2017, 38(5) : 31-38.
- [12] Jia N, Nie M, Yang G, et al. Influences of cosmic microwave background radiation on the quantum satellite down-chain communication performance and entanglement reserves[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2017, 23(2): 111-121.
- 贾娜, 聂敏, 杨光, 等. 宇宙微波背景辐射对量子卫星信道性能及纠缠储备量的影响[J]. *量子光学学报*, 2017, 23(2): 111-121.
- [13] Nie M, Tang S R, Yang G, et al. Influence of the ionospheric sporadic E layer on the performance of quantum satellite communication in the mid latitude region [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (7) : 070302.
- 聂敏, 唐守荣, 杨光, 等. 中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信性能的影响[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070302.
- [14] Li J, Mao J T. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties [J]. *Meteorological*, 2006, 32(2): 9-13.
- 李娟, 毛节泰. 冰晶性质对卷云辐射特征影响的模拟研究[J]. *气象*, 2006, 32(2): 9-13.
- [15] Hu S L T, Bao Y H, Xu J, et al. Radiative properties of cirrus clouds based on hexagonal and spherical ice crystals models [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1165-1168.
- 胡斯勒图, 包玉海, 许健, 等. 基于六角形和球形冰晶模型的卷云辐射特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(5): 1165-1168.
- [16] Ke X Z, Yu J H, Wang M J. Research on atmospheric reflectance characteristics of three laser wavelength ice clouds in pseudospherical mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2019, 53 (12) : 116-125.
- 柯熙政, 于记华, 王明军. 伪球面模式下三种激光波长冰云大气反射率特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 53(12): 116-125.
- [17] Yu J H. Study on light scattering and radiative transfer properties of water clouds and ice clouds [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 1-76.
- 于记华. 水云 and 冰云的光散射与辐射传输特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 1-76.
- [18] Liao Z J, Yang C P. Creating of the scattering and absorption properties database of ice crystals [C]// 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, June 24-26, 2011, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2011: 2059-2062.
- [19] Mitchell D L, Liu Y G, Macke A. Modeling cirrus clouds. part II: treatment of radiative properties [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53 (20): 2967-2988.
- [20] Liou K N, Takano Y, Ou S C, et al. Laser transmission through thin cirrus clouds [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4886-4894.
- [21] Kokhanovsky A. Springer series in light scattering [M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [22] Yang P, Hioki S, Saito M, et al. A review of ice cloud optical property models for passive satellite remote sensing [J]. *Atmosphere*, 2018, 9 (12) : 499-529.
- [23] Yi B Q, Yang P, Liu Q H, et al. Improvements on the ice cloud modeling capabilities of the community radiative transfer model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121 (22) : 13577-13590.
- [24] Marco L. Quantum Radar [M]. Zhou W X, Wu M Y, Jin L, et al., Transl. 2th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 15-17.
- Marco L. 量子雷达 [M]. 周万幸, 吴鸣亚, 金林, 等, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 15-17.
- [25] Yin H, Han Y. Quantum communication theory and technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2013: 76-130.
- 尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 76-130.
- [26] Yin H, Ma H X. Introduction to quantum communication in military [M]. Beijing: Military Science Press, 2006: 48-49.
- 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 48-49.
- [27] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation



- and quantum information [M]. Zhao Q C., Transl. 3th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 60-75.
- Nielsen M A, Chuang I L. 量子计算与量子信息 [M]. 赵千川, 译. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 60-75.
- [28] Nie M, Wang Y, Yang G, et al. Optimal mean photon number of decoy state protocol based on chameleon self-adaptive strategy under the background of rainfall [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 020303.  
聂敏, 王允, 杨光, 等. 降雨背景下诱骗态协议最优平均光子数的变色龙自适应策略 [J]. 物理学报, 2016, 65(2): 020303.
- [29] Zhang L, Nie M, Liu X H. Study on survival function of noise quantum channel and its simulation [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 150301.  
张琳, 聂敏, 刘晓慧. 有噪量子信道生存函数研究及其仿真 [J]. 物理学报, 2013, 62(15): 150301.
- [30] Pei C X, Zhu C H, Nie M, et al. Quantum communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013.  
裴昌幸, 朱畅华, 聂敏, 等. 量子通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.