

# 雾对自由空间量子通信性能的影响

张秀再<sup>1,2\*</sup>, 徐茜<sup>2</sup>, 刘邦宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 为了研究雾对自由空间量子通信的影响,根据雾滴谱分布函数和消光系数,研究了雾的能见度及传输距离对链路衰减、量子通信信道容量、信道保真度及信道误码率的影响,并进行了仿真实验。结果表明,当传输距离为9 km,能见度分别为0.2 km和0.6 km时,对应的链路衰减,信道容量,信道保真度,信道误码率分别为0.76和0.25,0.24和0.4,0.91和0.97,0.01和 $3.26 \times 10^{-7}$ 。由此可见,能见度小于1 km时,雾对各项性能影响较为显著。因此,应根据雾的能见度来调整通信系统的各项参数以保证通信的顺利进行。

**关键词** 量子光学; 量子通信; 消光系数; 能见度; 链路衰减; 信道容量

中图分类号 TN929.1; O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0727001

## Influence of Fog on Performance of Free-Space Quantum Communication

Zhang Xiuzai<sup>1,2\*</sup>, Xu Xi<sup>2</sup>, Liu Bangyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;*

<sup>2</sup>*School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

**Abstract** In order to study the effect of fog on quantum communication in free space, the effects of fog visibility and transmission distance on link attenuation, quantum communication channel capacity, channel fidelity and channel error rate are studied according to the distribution function and extinction coefficient of fog drop spectra. The simulation experiment is also conducted. The results show that when the transmission distance is 9 km and the visibility is 0.2 km and 0.6 km, the corresponding link decay, channel capacity, channel fidelity, channel error rate are 0.76 and 0.25, 0.24 and 0.4, 0.91 and 0.97, 0.01 and  $3.26 \times 10^{-7}$ , respectively. It can be seen that when the visibility of foggy days is less than 1 km, the influence of fog on the performance is more significant. Therefore, the parameters of the communication system should be adjusted to ensure the smooth progress of communication based on fog visibility.

**Key words** quantum optics; quantum communication; extinction coefficient; visibility; link attenuation; channel capacity

**OCIS codes** 270.5565; 270.5585

## 1 引 言

量子通信是利用量子态和量子纠缠效应进行信息或密钥传输的新型通讯方式<sup>[1]</sup>,具有传统通信方式所不具备的绝对安全特性,在国家安全、金融等信息安全领域有着重大的应用价值,已实现从单一自由度量子到多自由度量子体系的隐形传输<sup>[2]</sup>。2007

年,美国实现了远距离量子通信及两独立原子的量子纠缠。日本将量子噪声保密与量子密钥开发技术相结合,开发出高速、大容量且具有隐秘性的光通信系统。2016年,我国建成了世界上首条量子信息保密干线——京沪干线<sup>[3]</sup>。同年8月,由中国科学家自主研发的世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”在酒泉卫星发射中心成功发射,为建立全球光量子通

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-12-03; 录用日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11504176,61601230)、江苏省高校自然科学基金项目(13KJA510001)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20141004)

\* E-mail: zxzhering@163.com

信网络奠定了坚实的基础<sup>[4]</sup>。目前,量子通信的多种技术如量子态调控、量子存储、量子探测等都得到一定的发展,各种量子理论也愈加完善。文献[5]集中研究了超快激光场对分子转动、解离以及原子分子电离的量子态调控;文献[6]改进了用于连续变量量子存储的平衡零拍探测器,得到了一种可以实时测量短脉冲光信号正交分量的快速响应平衡零拍探测器。

在自由空间进行通信时,量子态不可避免会受到信道环境因素的影响。聂敏等<sup>[7]</sup>研究了 PM<sub>2.5</sub> 指数对自由空间量子通信各性能的影响,为不同 PM<sub>2.5</sub> 污染指数下参数的调整提供了参考。文献[8]研究了具有不同冰水含量的冰水混合云对量子卫星通信的影响,为该天气下量子通信参数的调整提供了参考依据,提高了通信的可靠性。常乐<sup>[9]</sup>研究了灰霾粒子与水云粒子的混合、中层海水水色三要素及海浪对量子通信性能的影响,为星潜与水

下量子通信性能的提高提供了理论参考。关于具有不同能见度的雾天对自由空间量子通信影响的研究鲜有报道。

雾是悬浮于空中的细微水滴,会使地面水平能见度下降。在量子通信过程中,由雾对光的吸收和散射引起的消光性是影响光子传输的最主要因素<sup>[10]</sup>。本文根据雾滴谱分布,研究雾的消光系数与雾天能见度的关系,分析链路衰减与雾天能见度的关系,建立雾天能见度与量子通信信道容量以及信道生存函数的定量关系,并进行仿真实验,为雾天量子通信参数的调整提供理论依据。

## 2 雾对通信链路的影响

根据雾的形成地域和形成机理,可把雾分成两大类:平流雾和辐射雾。海雾通常为平流雾,内陆雾通常为辐射雾。根据能见度可把雾划分为几个等级<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。

表 1 雾天等级划分标准

Table 1 Classification standard for foggy days

Fog level	Strong fog	Thick fog	Heavy fog	Fog	Light fog
Visibility /km	(0,0.05)	[0.05, 0.20)	[0.20, 0.50)	[0.50, 1.00)	[1.00, 10.00)

雾的含水量  $W$  (质量浓度,  $g \cdot m^{-3}$ ) 和能见度  $V$  (km) 的经验关系<sup>[12]</sup>可表示为

平流雾:

$$W = (18.35 V)^{-1.43} = 0.0156 V^{-1.43}, \quad (1)$$

辐射雾:

$$W = (42.00 V)^{-1.54} = 0.00316 V^{-1.54}. \quad (2)$$

本文以平流雾为例,分析雾对自由空间量子通信的影响。

雾滴尺寸分布通常用  $\Gamma$  分布 (Khragian-Mazin 分布) 模型<sup>[13]</sup>描述为

$$n(r) = ar^2 \exp(-br), \quad (3)$$

式中:  $n(r)$  为单位体积、单位半径间隔内的雾滴数;  $r$  为雾滴半径;  $a$  和  $b$  为雾滴尺寸分布参数,用于确定雾滴谱形状。

雾滴尺寸分布参数与含水量和能见度的关系分别为

$$a = [9.781/(V^6 W^5)] \times 10^{15}, \quad (4)$$

$$b = [1.304/(VW)] \times 10^4. \quad (5)$$

雾天大气中的气体分子与气溶胶粒子具有吸收和散射特性,而在底层大气中,气体分子的消光系数远低于气溶胶粒子的消光系数,且雾天中主要起吸收消光作用的  $NO_2$  气体浓度偏低,可忽略。因此,

重点考虑的是气溶胶粒子的散射消光系数。若雾滴尺寸分布已知,则消光系数<sup>[14]</sup>可表示为

$$k_{\text{ext}} = \pi \int_0^{\infty} r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) n(r) dr, \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为光波长;  $m$  为雾粒子的复折射率;  $Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m)$  为雾滴的有效消光因子,由于绝大部分雾滴尺寸远大于可见光波长,认为雾滴的有效消光因子为 2 是可行的。

消光系数与雾天能见度的关系如图 1 所示。由图 1 可知,随着雾天能见度的减小,消光系数变大,在能见度小于 1 km 时,消光系数急剧增大。因此,

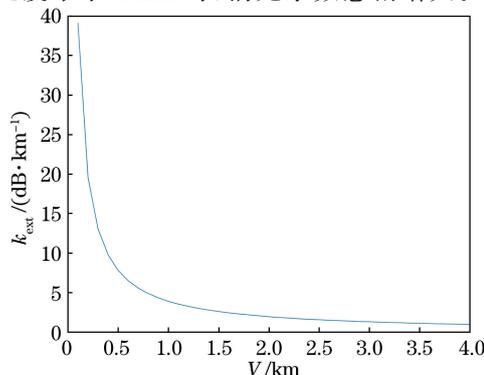


图 1 消光系数与能见度的关系

Fig. 1 Relationship between extinction coefficient and visibility

雾天对消光系数的影响比较大,会严重影响光子的传输。

量子信息在星地之间进行传输时,由雾导致的能量衰减<sup>[15]</sup>为

$$E = E_0 \exp(-k_{\text{ext}} d), \quad (7)$$

式中: $E$  为量子信息传输后的能量; $E_0$  为量子信息的初始能量; $d$  为传输距离。

取对数运算,可得到链路衰减因子为

$$L_{\text{att}} = 10 \cdot k_{\text{ext}} \cdot \lg e \cdot d. \quad (8)$$

忽略大气中其他粒子的影响,链路衰减与雾天能见度、传输距离的关系如图 2 所示。由图 2 可知,当传输距离一定时,能见度增加,能量衰减减小,链路衰减呈下降趋势且在  $V=0.2, d=10$  处取得最大值;当能见度保持不变时,随着传输距离的增加,链路衰减增加。当传输距离为 8 km,能见度由 0.2 km 增加到 1.2 km 时,链路衰减从 0.68 减小至 0.11;当能见度为 0.2 km,传输距离由 1 km 增加到 8 km 时,链路衰减从 0.08 增加至 0.7。因此,较低的雾天能见度会严重影响量子通信链路的传输性能,可通过增加量子的脉冲强度、耦合强度等参数来降低链路衰减,提高通信质量。

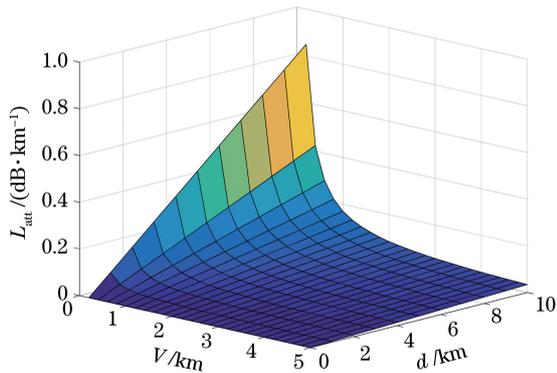


图 2 链路衰减与雾天能见度、传输距离的关系

Fig. 2 Relationship among link attenuation, fog visibility, and transmission distance

### 3 雾对量子通信信道容量的影响

雾使光子在传输过程中发生能量衰减,进而造成光量子的丢失,导致接收方无法正确地接收到光子所含信息,影响量子通信的性能。以幅值阻尼信道作为噪声信道来研究雾对信道容量的影响。

雾的量子初态为  $|e_1\rangle$ ,量子系统的基态为  $|0\rangle$ ,激发态为  $|1\rangle$ 。在两者碰撞后,由于光量子的丢失,量子态会以概率  $p$  从  $|1\rangle$  跃迁到  $|0\rangle$ ,环境即雾天的量子态会以概率  $p$  从  $|e_1\rangle$  跃迁到  $|e_0\rangle$ ,  $|e_0\rangle$  为跃迁

后的量子态。信道对量子态的变换可用么正变换  $U$  来表示,雾与量子态组成的复合系统的么正变换  $U^{[16]}$  表示为

$$U: \begin{cases} |0\rangle |e_1\rangle \rightarrow |0\rangle |e_1\rangle \\ |1\rangle |e_1\rangle \rightarrow \sqrt{1-p} |1\rangle |e_1\rangle + \sqrt{p} |0\rangle |e_0\rangle \end{cases}, \quad (9)$$

则起雾环境混合基可表示为

$$U = \alpha |0\rangle |e_1\rangle + \beta |1\rangle |e_1\rangle = (\alpha |0\rangle + \sqrt{1-p}\beta |1\rangle) |e_1\rangle + \sqrt{p}\beta |0\rangle |e_0\rangle, \quad (10)$$

式中: $|\alpha|^2, |\beta|^2$  分别为量子比特在状态  $|0\rangle, |1\rangle$  上出现的概率,  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。幅值阻尼信道的两个运算元为

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $p$  为受雾粒子影响在幅值阻尼信道中丢失一个光量子的概率。

对于一个量子系统的初始密度矩阵  $\rho =$

$$\begin{bmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{01}^* & \rho_{11} \end{bmatrix}, *$$
 表示复数的共轭,在经过幅值阻尼信道后<sup>[17]</sup>演化成

$$\epsilon(\rho) = \$(\rho) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - (1-p)(1-\rho_{00}) & \rho_{01}\sqrt{1-p} \\ \rho_{01}^*\sqrt{1-p} & \rho_{11}(1-p) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $\$$  是一个映射,表示量子系统与环境作用后演化成的形式。

设量子系统  $\{p_i, \rho_i\}$ ,  $p_i$  表示量子系统以  $p_i$  的概率处于状态  $\rho_i$ ,且  $\sum p_i = 1, i$  表示系统处于第  $i$  个状态,  $i=1, 2, 3, \dots$ 。输入字符  $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|, \rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ ,在雾的作用下,量子系统的状态演化为

$$\epsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right) \equiv \$\left(\sum_i p_i \rho_i\right) = \epsilon[p_1 \rho_1 + (1-p_1) \rho_2] =$$

$$p_1 \epsilon(\rho_1) + (1-p_1) \epsilon(\rho_2) =$$

$$\begin{bmatrix} p_1 + p - p_1 p & 0 \\ 0 & 1 - p_1 p - p_1 - p \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $\rho_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \rho_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

本演化对应的冯诺依曼熵<sup>[18]</sup>为

$$S(\rho) = S\left[\epsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right)\right] = -\sum_i \lambda_i \lg \lambda_i = -(p_1 + p - p_1 p) \lg(p_1 + p - p_1 p) - (1 - p_1 p - p_1 - p) \lg(1 - p_1 p - p_1 - p), \quad (14)$$

式中: $\lambda_i$  是  $\rho$  的固本征值。由此,幅值阻尼信道

的信道容量<sup>[19]</sup>为

$$C = \max\left\{S[\varepsilon(\rho_i \rho_i)] - \sum_i p_i S[\varepsilon(\rho_i)]\right\} = \max\left[-(p_1 + p - p_1 p) \text{lb}(p_1 + p - p_1 p) - (1 - p_1 p - p_1 - p) \text{lb}(1 - p_1 p - p_1 - p) - (1 - p_1) H(p)\right], \quad (15)$$

式中:  $H(p)$  是二元熵,  $H(p) = -p \text{lb} p - (1-p) \text{lb}(1-p)$ 。为了简化, 引入参数  $t$ , 对(15)式进行求导, 可求得  $p_1 = [t(1-p) - p]/[(1+t) \cdot (1-p)]$ ,  $t = 2H(p)/(1-p)$  时, (15)式取得最大值。

受雾的影响, 丢失一个光子的概率  $p$  与雾能见度的关系为

$$p = 1 - \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d). \quad (16)$$

幅值阻尼信道的信道容量与雾天能见度、传输距离的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 能见度一定时, 随着传输距离的增加, 信道容量呈减小趋势。当能见度小于 1 km, 传输距离不变时, 随着能见度的增加, 信道容量呈上升趋势。当传输距离为 10 km, 能见度由 0.2 km 变为 1 km 时, 信道容量由 0.21 增加到 0.43; 而在能见度大于 1 km 时, 随着能见度的不断增加, 信道容量继续缓慢增加。因此, 雾天能见度及传输距离对量子通信信道容量的影响较大, 可通过增加信道的带宽或增加光信号的发射功率来改善量子通信的传输性能。

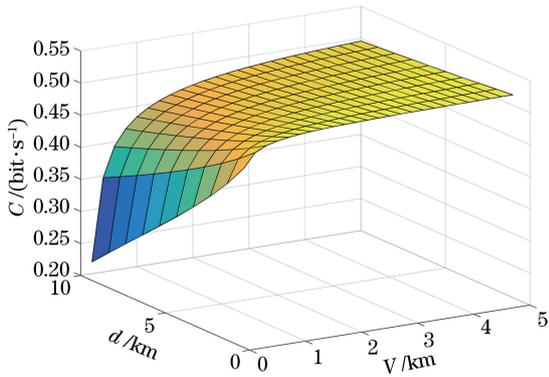


图 3 信道容量与雾天能见度、传输距离的关系

Fig. 3 Relationship among channel capacity, fog visibility, and transmission distance

#### 4 雾对量子信道保真度的影响

保真度是描述量子信号输出后的状态与初始状态相似程度的物理量。Jozsa 依据“跃迁几率”首先提出了保真度的概念, 定义了量子混合态的保真度。因此, 受雾的影响, 光子经信道传输的保真度<sup>[20]</sup>为

$$F = \text{Tr}(\rho^{1/2} \rho' \rho^{1/2})^{1/2}, \quad (17)$$

式中:  $\rho$  为输入字符的密度算子和  $\sum_i p_i \rho_i$ ;  $\rho'$  为输入字符后的演化  $\varepsilon(\sum_i p_i \rho_i)$ 。

根据前文, 有  $\rho = p_1 \rho_1 + (1 - p_1) \rho_2 =$

$$\begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & 1 - p_1 \end{bmatrix}, \quad \rho' = \begin{bmatrix} p_1 + p - p_1 p & 0 \\ 0 & 1 - p_1 p - p_1 - p \end{bmatrix}.$$

得出保真度

$$F = \text{Tr}(\rho^{1/2} \rho' \rho^{1/2})^{1/2} = \text{Tr} \begin{bmatrix} \sqrt{p_1(p_1 + p - p_1 p)} & 0 \\ 0 & (1 - p_1) \sqrt{1 - p} \end{bmatrix} = [\rho_1(p_1 + p - p_1 p)]^{1/2} + (1 - p_1)(1 - p)^{1/2}, \quad (18)$$

根据上文可知,  $p = 1 - \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d)$ , 由此得到信道保真度与能见度及传输距离的关系。

对量子状态处于  $\rho_1$  的概率  $p_1$  取 0.1, 保真度与雾天能见度、传输距离的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 能见度一定时, 随着传输距离的增加, 信道保真度呈减小趋势。雾天能见度小于 1 km, 传输距离不变时, 随着能见度的减小, 保真度急剧减小。当传输距离为 10 km, 能见度由 1 km 变为 0.2 km 时, 保真度由 0.98 减小到 0.9; 能见度大于 1 km 时, 保真度变化较为平缓, 随着能见度的增加, 保真度缓慢增大。因此, 雾天能见度及传输距离对量子通信保真度有一定影响, 可通过调整发送端脉冲平均光子数来提高保真度, 提高传输的成功率。

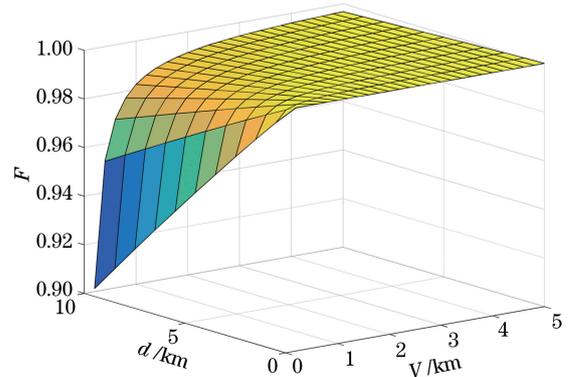


图 4 保真度与雾天能见度、传输距离的关系

Fig. 4 Relationship among fidelity, fog visibility, and transmission distance

#### 5 雾对信道误码率的影响

光信号在雾天环境传输时, 因光子衰变会产生误码。量子误码率为接收到的误码比特数与总比特数的比率<sup>[21]</sup>, 表示为

$$B_F = \frac{R_{\text{fog}}}{R_{\text{sift}}}, \quad (19)$$

式中:  $B_F$  为雾引起的误码率;  $R_{\text{fog}}$  为由雾引发的误码比特数;  $R_{\text{sift}}$  为总比特数。由文献[21]可得

$$B_F = \frac{1}{2} \times \frac{V\tau n}{1 - \exp(-\mu T_0 P_{\text{acq}} T_{\text{app}} \eta_{\text{det}} F_{\text{mea}})}, \quad (20)$$

式中:  $\tau$  为时间窗口;  $n$  为探测器的数目;  $\mu$  为每脉冲的平均光子数;  $T_0$  为雾天的信道传输率;  $P_{\text{acq}}$  为单个光子捕获率;  $T_{\text{app}}$  为系统装置的传输率;  $\eta_{\text{det}}$  为单光子探测器的量子效率;  $F_{\text{mea}}$  为测量因子。

雾天的信道传输率为

$$T_0 = E/E_0 = \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d). \quad (21)$$

以 BB84 协议<sup>[22]</sup> 为参考, 其余各参取值情况如表 2 所示。

表 2 各参量取值情况

Table 2 Value of each parameter

Parameter	$\tau$	$n$	$\mu$	$P_{\text{acq}}$	$T_{\text{app}}$	$\eta_{\text{det}}$	$F_{\text{mea}}$
Content	1 ns	1	1	0.5	1	65%	1

信道误码率与雾天能见度、传输距离的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 在能见度小于 0.4 km, 传输距离大于 6 km 时, 信道误码率有一定的变化幅度。当传输距离不变时, 随着能见度的增加, 信道误码率不断减小。传输距离为 10 km, 能见度由 0.2 km 增加到 0.4 km 时, 误码率由  $0.096$  减小到  $1.087 \times 10^{-5}$ 。因此, 雾对量子通信信道误码率的影响较小, 当雾天能见度大于 0.4 km 时, 不用考虑雾天引起的信道误码率。

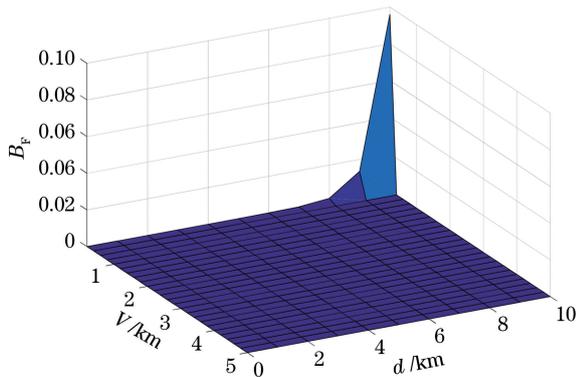


图 5 误码率与雾天能见度、传输距离的关系

Fig. 5 Relationship among error rate, fog visibility, and transmission distance

## 6 结 论

研究了雾对自由空间量子通信性能的影响, 根

据雾滴谱分布函数和消光系数, 研究了雾天能见度与链路衰减的关系。针对幅值阻尼信道, 分析了雾天能见度和传输距离对幅值阻尼信道信道容量、保真度及误码率的影响, 并进行了仿真。仿真结果表明, 随着雾天能见度和传输距离的变化, 链路衰减、信道容量、保真度及误码率都发生了不同程度的变化。随着传输距离的增加, 信道容量及保真度不断减小, 链路衰减及误码率呈上升趋势。随着雾天能见度的增加, 信道容量和保真度不断增加, 链路衰减及误码率呈下降趋势。且能见度小于 1 km 时, 各项性能变化最为明显。因此, 可根据雾天能见度及传输距离对量子通信的相关参数进行定量调整, 以保障雾天量子通信的顺利进行。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou J C. Current situation and development of quantum communication [J]. China Strategic Emerging Industry, 2018 (32): 27.  
周家丞. 量子通信现状与发展[J]. 中国战略新兴产业, 2018, (32): 27.
- [2] Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon [J]. Nature, 2015, 518(7540): 516-519.
- [3] Tang C, Fang J M, Wang L N, et al. The development trend and planning analysis of quantum information technology [J]. World Sci-Tech R & D, 2017, 39(5): 448-456.  
唐川, 房俊民, 王立娜, 等. 量子信息技术发展态势与规划分析 [J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39 (5): 448-456.
- [4] Muller A, Breguet J, Gisin N. Experimental demonstration of quantum cryptography using polarized photons in optical fibre over more than 1 km [J]. Europhysics Letters (EPL), 1993, 23(6): 383-388.
- [5] Luo S Z, Chen Z, Li X K, et al. Quantum state control of atoms and molecules in ultrafast femtosecond laser field [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126007.  
罗嗣佐, 陈洲, 李孝开, 等. 超快飞秒激光场中原子分子量子态调控 [J]. 光学学报, 2019, 39 (1): 0126007.
- [6] Ma L X, Qin J L, Yan Z H, et al. A fast response balanced zero beat detector for continuous variable quantum storage [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (2): 0227001.  
马丽霞, 秦际良, 闫智辉, 等. 用于连续变量量子存储的快速响应平衡零拍探测器 [J]. 光学学报, 2018,

- 38(2): 0227001.
- [7] Nie M, Ren J, Yang G, et al. Influences of  $PM_{2.5}$  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.  $PM_{2.5}$  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] Chang L. Study on the performance of quantum communication in the atmosphere and the ocean environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2018: 65-78.  
 常乐. 大气及海洋中量子通信性能研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2018: 65-78.
- [10] Luo C X, Du Y C, Shi S. Changes regulation analysis on the infrared radiative properties of single droplet and aerosol[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2016, 45(1): 70-73.  
 罗成效, 杜永成, 石松. 单雾滴与雾滴气溶胶红外辐射特性参数变化规律分析[J]. *机电工程技术*, 2016, 45(1): 70-73.
- [11] Li G, Wu J F, Lei Z Y. Research progress of image haze grade evaluation and dehazing technology [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(9): 1-6.  
 李滚, 吴劫夫, 雷志勇. 图像雾霾等级评价及去雾技术研究进展[J]. *激光杂志*, 2014, 35(9): 1-6.
- [12] Zhao Z W, Wu Z S. Method for determining fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength[J]. *Journal of Xidian University*, 2002, 29(2): 253-256.  
 赵振维, 吴振森. 确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减特性[J]. *西安电子科技大学学报*, 2002, 29(2): 253-256.
- [13] Zhang C, Liu H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(6): 062107.
- [14] Mao T P, Zhou D F, Niu Z X, et al. The calculation model of the attenuation due to clouds or fog and the analysis of its characteristic [J]. *Wireless Communication Technology*, 2004, 13(3): 51-54.  
 毛天鹏, 周东方, 牛忠霞, 等. 毫米波云雾衰减计算模型及特性分析[J]. *无线通信技术*, 2004, 13(3): 51-54.
- [15] Feng Y. The characteristic of fog extinction in expressway and impact on traffic safety[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009: 64-80.  
 冯月. 高速公路沿线雾的消光系数特性及对交通安全的影响[D]. 西安: 长安大学, 2009: 64-80.
- [16] Yin H, Ma H X. Introduction to quantum communication in military [M]. Beijing: Military Science Press, 2006: 227-228.  
 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版, 2006: 227-228.
- [17] Zhang Y D. Principles of quantum information physics [M]. Beijing: Science Press, 2005: 125-151.  
 张永德. 量子信息物理原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 125-151.
- [18] Yin H, Han Y. Quantum communications theory and technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 78-83.  
 尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 78-83.
- [19] Chen H W. Concise tutorial on quantum information and quantum computing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006: 180-185.  
 陈汉武. 量子信息与量子计算简明教程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006: 180-185.
- [20] Yan Y. Research on some issues of quantum communication in free space [D]. Xi'an: Xidian University, 2009: 49-53.  
 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.
- [21] Zhang G Y, Yu S Y, Ma J, et al. Influence of background light on quantum bit error rate in satellite-to-ground quantum key distribution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(2): 126-129.  
 张光宇, 于思源, 马晶, 等. 背景光对星地量子密钥分配量子误码率的影响[J]. *光电工程*, 2007, 34(2): 126-129.
- [22] Miao X J. Multiple-quantum operator algebra spaces and description for unitary time evolution of multilevel spin systems [J]. *Molecular Physics*, 2000, 98(10): 625-631.