



## 降雪对地表附近自由空间量子信道的影响及参数仿真

聂敏 王超旭 杨光 张美玲 孙爱晶 裴昌幸

Influence of snowfall on free-space quantum channel near earth surface and parameter simulation

Nie Min Wang Chao-Xu Yang Guang Zhang Mei-Ling Sun Ai-Jing Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 70, 030301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200972

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200972>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略

Parameters adaptive adjustment strategy of quantum communication channel in free-space based on software-defined quantum communication

物理学报. 2019, 68(14): 140302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190462>

经典场驱动对量子系统生存概率的影响

Influence of classical field driving on survival probability in quantum Zeno and anti-Zeno effect

物理学报. 2019, 68(23): 230303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191078>

基于混合光模式阵列的自由空间编码通信

Free-space optical communication based on hybrid optical mode array encoding

物理学报. 2017, 66(14): 144102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144102>

一种测量大气消光系数边界值的新方法

A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient

物理学报. 2018, 67(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172008>

基于量子隐形传态的量子保密通信方案

Quantum communication scheme based on quantum teleportation

物理学报. 2017, 66(23): 230303 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230303>

中纬度地区电离层偶发E层对量子卫星通信性能的影响

Influence of the ionospheric sporadic E layer on the performance of quantum satellite communication in the mid latitude region

物理学报. 2017, 66(7): 070302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070302>

# 降雪对地表附近自由空间量子信道的影响及参数仿真<sup>\*</sup>

聂敏<sup>1)</sup> 王超旭<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>

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)

(2020年6月24日收到; 2020年9月13日收到修改稿)

量子通信具有覆盖面广、安全保密的优势, 是当前通信领域国内外的研究热点。在自由空间量子通信过程中, 光量子信号需要在地表上空一定高度进行传输, 因此各种环境因素, 例如降雪、沙尘暴、降雨、雾霾、浮尘等, 不可避免地会影响量子通信性能。然而, 迄今为止, 降雪对地表附近自由空间量子信道影响的研究尚未展开。为此, 根据降雪的强度, 将降雪分为小雪( $S_1$ )、中雪( $S_2$ )、大雪( $S_3$ )和暴雪( $S_4$ )四个等级。由于空中正在飘落雪花对光量子信号具有能量吸收作用, 称为消光效应, 不同强度的降雪, 其消光效应对自由空间光量子信号的影响不同。本文首先建立了不同等级降雪对光量子信号消光效应的数学模型; 然后建立了因降雪导致的自由空间消光衰减定量关系, 信道极限生存函数、不同降雪强度下的信道容量和量子误码率等性能参数受降雪影响的变化情况; 最后建立了降雪强度、传输距离与链路衰减、幅值阻尼信道容量、信道生存函数以及信道误码率的数学模型。仿真结果表明, 当降雪强度为  $2.1 \text{ mm/d}$  ( $S_1$ ), 传输距离为  $2.2 \text{ km}$  时, 通信链路衰减为 0.0362, 信道容量为 0.7745, 信道生存函数为 0.2329, 信道误码率为 0.0105。当降雪强度为  $3.8 \text{ mm/d}$  ( $S_2$ ), 传输距离为  $3.5 \text{ km}$  时, 通信链路衰减为 0.1326, 信道容量为 0.4922, 信道生存函数为 0.2099, 信道误码率为 0.019。由此可见, 降雪对量子通信性能有不同程度的影响。所以在实际应用中应根据降雪强度大小, 自适应调节量子通信相关参数, 提高量子通信的可靠性。

**关键词:** 量子通信, 降雪强度, 消光系数, 生存函数

**PACS:** 03.67.Hk, 03.65.Yz, 42.50.Md

**DOI:** 10.7498/aps.70.20200972

## 1 引言

量子通信目前是国内外的研究前沿和热点, 在国防、金融等领域有着重要的作用, 并具有显著的优点, 例如量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)协议具有较强的安全性<sup>[1]</sup>。2016年, Smania 等<sup>[2]</sup>提出了三层量子通信系统的通信协议, 并且实现了三方量子通信的信息加密共享。

2020年, Bäuml 等<sup>[3]</sup>通过线性程序实现了量子互联网上的量子纠缠与密钥分发, 使得量子互联网的实现更进一步。2020年 Bhaskar 等<sup>[4]</sup>使用 17, 18, 19 纳米光子的金刚石谐振器, 实现了异步光子钟态测量, 有效地使量子通信以超过理想的等效损耗直接传输。2010年, 潘建伟团队<sup>[5]</sup>实现了  $16 \text{ km}$  的量子隐形传态实验。2016年, “墨子号”成功发射, 全球瞩目<sup>[6]</sup>。2017年, 潘建伟团队<sup>[7]</sup>完成了  $53 \text{ km}$  的自由空间密钥分发。2020年, 潘建伟团队

\* 国家自然科学基金(批准号: 61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划项目(批准号: 2015KW-013)和陕西省教育厅专项科研计划(批准号: 16JK1711)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: 55197424@qq.com

等<sup>[8]</sup>利用“墨子号”量子科学实验卫星,通过基于纠缠的QKD协议,在国际上首次实现无中继千公里级的量子保密通信,大幅度提升了量子通信距离.

然而,量子通信在进行传输时,不可避免地会受到自由空间各种大气环境因素的影响,如图1所示.文献[9]研究了三种不同形状的气溶胶粒子、不同大气相对湿度背景下的量子通信性能.文献[10]研究了地球中纬度地区背景下的偶发E层对量子通信的影响.文献[11]研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信的影响.文献[12]根据降雨的分布模型,提出了变色龙算法,通过调整每脉冲光子数,提高量子通信质量.文献[13]根据自然环境下对量子通信的干扰因素,提出了基于袋鼠纠缠跳跃模型的自适应通信策略,提高了量子通信在雾霾沙尘暴等干扰下的性能.这些都是不同环境下,量子通信受到自然环境因素的影响以及所采取的抗干扰策略,对未来的研究有着重要的参考意义.



图1 自由空间量子通信简图

Fig. 1. Schematic diagram of free space quantum channel.

由于降雪会产生消光作用<sup>[14]</sup>,对量子通信质量有一定的影响.因此,本文根据降雪的谱分布函数以及雪对光量子的吸收和散射所引起的消光特性,研究了降雪消光系数和降雪强度之间的关系,进一步研究了光量子能量与降雪强度之间的关系,建立了降雪强度与幅值阻尼信道容量、信道生存函数和信道误码率之间的关系,通过仿真研究,为降雪条件下地表附近自由空间量子通信提供参考.

## 2 降雪强度与消光系数的关系

### 2.1 理论模型

根据24 h内的降雪量划分标准<sup>[15]</sup>,可将降雪强度按等级划分,划分结果如表1所列.

由于雪花一般都是不规则形状,因此常用 $\Gamma$ 分布描述降雪谱分布函数<sup>[16]</sup>,可表示为

$$N(D) = N_0 D^m e^{-AD}, \quad (1)$$

式中, $D$ 表示雪花的等效直径; $N_0$ 表示降雪浓度参数; $m$ 表示雪的形状因子,降雪一般服从指数分布,

所以 $m$ 可取0; $A$ 表示降雪谱分布斜率,与降雪强度 $S$ 的关系为<sup>[17]</sup>

$$A = 25.5S^{-0.48}. \quad (2)$$

已知降雪谱分布函数为 $N(D)$ ,由Mie散射可得雪的消光系数为<sup>[18]</sup>

$$\sigma = \frac{\pi}{4} \int_0^\infty D^2 \cdot Q_{\text{ext}}(D, \lambda, m) \cdot N(D) dD, \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{ext}}$ 表示雪的消光率因子,由于雪的最小直径大于10 μm,远大于可见光的波长,所以可认为 $Q_{\text{ext}} \approx 2$ <sup>[19]</sup>; $\sigma$ 的单位为dB/km.

表1 降雪强度划分标准

Table 1. Criteria for classification of snowfall intensity.

降雪量/mm	降雪强度等级
<2.5	小雪( $S_1$ )
2.5—5	中雪( $S_2$ )
5—10	大雪( $S_3$ )
>10	暴雪( $S_4$ )

### 2.2 仿真分析

根据(1)—(3)式,对降雪强度 $S$ 和消光系数 $\sigma$ 进行仿真分析,结果如图2所示.图中横坐标表示降雪强度 $S$ ,纵坐标表示消光系数 $\sigma$ .根据图2可知,随着降雪量增加,消光系数逐渐上升,当降雪强度为2 mm/d( $S_1$ )时,消光系数为4.11 dB/km.据此可知,降雪会影响光量子信号衰减.

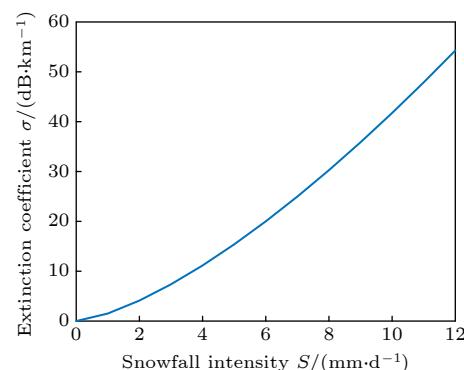


图2 降雪强度和消光系数之间的关系

Fig. 2. Relationship between extinction coefficient and snowfall intensity.

## 3 降雪对量子通信性能的影响

### 3.1 降雪对通信链路的影响分析

由Bougure定律<sup>[20]</sup>可知,消光系数 $\sigma$ 和光量

子能量  $E$  的关系式可表示为

$$E = E_0 \exp(-\sigma \cdot L), \quad (4)$$

式中,  $E_0$  表示光量子初始能量,  $L$  表示光量子传输距离. 取对数可得链路衰减因子为

$$L_{\text{att}} = 10 \cdot \frac{\pi N_0}{(25.5 S^{-0.48})^3} \cdot \lg e \cdot L. \quad (5)$$

对链路衰减  $L_{\text{att}}$ 、降雪强度  $S$  和光量子传输距离  $L$  之间的关系进行仿真, 结果如图 3 所示. 由图 3 可以看出: 当降雪强度  $S$  为 0 时, 此时为理想状态, 通信链路几乎无损耗; 随着降雪强度增加, 通信链路急剧衰减; 当降雪强度为 4.1 mm/d ( $S_2$ ), 传输距离 3.7 km 时, 通信链路为 0.1494. 据此可知, 降雪会对通信链路传输产生较大影响.

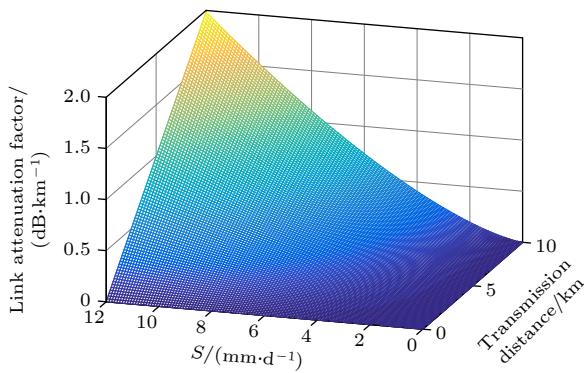


图 3 链路衰减与降雪强度、传输距离的关系

Fig. 3. Photon energy versus snowfall intensity and transmission distance.

### 3.2 降雪对信道容量的影响分析

在量子通信传输时, 降雪下的环境量子态和光量子态的复合系统经受联合幺正演化, 从而导致了消相干现象. 本文研究幅值阻尼信道容量变化.

幅值阻尼信道运算算子可以表示为<sup>[21]</sup>

$$T_k = \sum_n \sqrt{\binom{n}{k}} \sqrt{(1-\eta)^{n-k} \eta^k} |n-k\rangle \langle n|, \quad (6)$$

式中,  $|k\rangle, \langle n|$  分别表示降雪环境与量子湮灭算子的本征态;  $\eta$  为受到降雪丢失一个光量子的概率, 可表示为

$$\eta = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \exp(-\sigma \cdot L). \quad (7)$$

单光子比特状态下, 有

$$\rho = \begin{pmatrix} a & b \\ b^* & c \end{pmatrix}, \quad (8)$$

通过幅值阻尼信道后变为

$$\varepsilon(\rho) = \begin{bmatrix} 1 - (1-\eta)(1-a) & b\sqrt{1-\eta} \\ b*\sqrt{1-\eta} & c\sqrt{1-\eta} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

若输入字符  $\rho_1 = |0\rangle \langle 0|, \rho_2 = |1\rangle \langle 1|$ , 有

$$\begin{aligned} \varepsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right) &= \varepsilon[p_1 \rho_1 + (1-p_1) \rho_2] \\ &= p_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + (1-p_1) \begin{bmatrix} \eta & 0 \\ 0 & 1-\eta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} p_1 + (1-p_1)\eta & 0 \\ 0 & (1-p_1)(1-\eta) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $p_i$  表示信源量子符为  $\rho_i$  时的概率. (10) 式对应的冯诺依曼熵为<sup>[22]</sup>

$$\begin{aligned} s\left[\varepsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right)\right] \\ = -\{[p_1 + (1-p_1)\eta] \log [p_1 + (1-p_1)\eta] \\ + (1-p_1)(1-\eta) \log (1-p_1)(1-\eta)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

可得幅值阻尼信道的信道容量为

$$\begin{aligned} C = -\{p_1 + (1-p_1)\eta \log [p_1 + (1-p_1)\eta] \\ + (1-p_1)(1-\eta) \log (1-p_1)(1-\eta)\} \\ - (1-p_1) H_2(\eta), \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $H_2(\eta)$  为二元香农熵, 且  $p_1 = \frac{t(1-\eta)-\eta}{(1+t)(1-\eta)}$ ,  $t = 2^{\frac{H_2(\eta)}{1-\eta}}$ .

对信道容量、传输距离以及降雪强度进行仿真, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 当降雪量  $S$  以及传输距离  $L$  增加时, 信道容量  $C$  逐渐减小; 信道容量为 1 时为理想信道, 且降雪量和传输距离均为 0; 当降雪强度为 2.2 mm/d, 传输距离为 7.2 km 时,

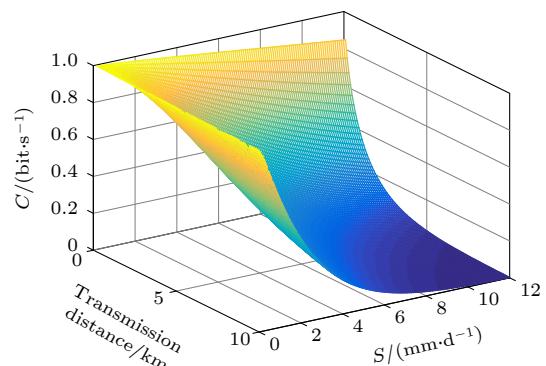


图 4 信道容量与降雪强度、传输距离的关系

Fig. 4. Channel capacity versus snowfall intensity and transmission distance.

信道容量衰减到 0.51. 由此可知, 降雪对量子通信的信道容量影响较大, 因此需要根据降雪强度的大小, 自适应调节量子通信的各项参数, 以满足人们对量子通信的需求.

### 3.3 降雪对量子通信系统生存函数的影响分析

生存函数<sup>[23]</sup>可表示为

$$B = \xi \cdot F, \quad (13)$$

式中,  $\xi$  表示降雪背景下的信道生存系数,  $F$  表示降雪背景下信道的传输保真度. 生存系数可定义为

$$\xi = \frac{5809}{5810} - \frac{9\sigma}{2905}, \quad (14)$$

保真度  $F$  可表示为<sup>[24]</sup>

$$F = F(\rho, \rho') = \left( \text{tr} \sqrt{\rho^{1/2} \rho' \rho^{1/2}} \right)^2, \quad (15)$$

那么降雪情况下的信道生存函数可定义为

$$\begin{aligned} B &= \xi \cdot F = \xi \cdot F \left[ \sum_i p_i \rho_i, \varepsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \right] \\ &= \xi \cdot \text{tr} \left\{ \left[ \left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{1/2} \cdot \varepsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{1/2} \right]^{1/2} \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

根据幅值阻尼信道的性质, 可得

$$\varepsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) = \begin{bmatrix} p_1 + (1-p_1) & 0 \\ 0 & (1-p_1)(1-\eta) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

所以信道生存函数可表示为

$$\begin{aligned} B &= \xi \cdot F = \xi \cdot \{ p_1 [p_1 + (1-p_1)\eta] \}^{1/2} \\ &\quad + (1+p_1) \sqrt{1-\eta}, \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $p_1$  表示信源取  $\rho_1$  的概率, 可进一步写为

$$\begin{aligned} B &= \xi \cdot \left[ p_1 \left( p_1 + (1-p_1) \right. \right. \\ &\quad \times \left. \left. \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{\pi N_0}{(25.5 S^{-0.48})^3} \cdot L \right] \right\} \right) \right]^{1/2} \\ &\quad + (1+p_1) \sqrt{1 - \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{\pi N_0}{(25.5 S^{-0.48})^3} \cdot L \right] \right\}}. \end{aligned} \quad (19)$$

对降雪强度、传输距离及信道生存函数进行仿真, 如图 5 所示. 由图 5 可以看出: 当降雪量以及

传输距离增加时, 生存函数逐渐下降; 当降雪强度为 4.4 mm/d ( $S_2$ ), 传输距离为 7.7 km 时, 生存函数为 0.2004. 由此可知, 降雪对量子通信的信道生存函数有着较为明显的影响, 因此需要根据降雪强度的大小, 调整量子通信相关参数, 保证量子通信质量.

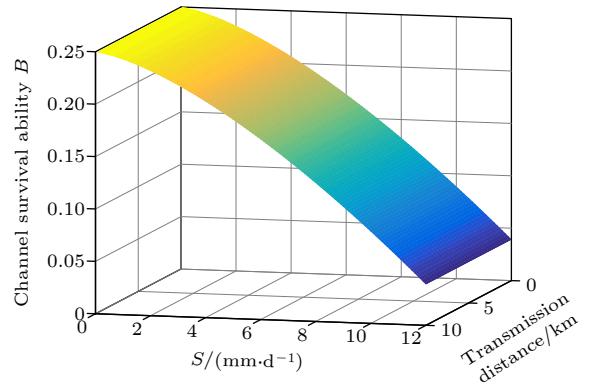


图 5 生存函数与降雪强度、传输距离的关系

Fig. 5. Channel survival ability versus snowfall intensity and transmission distance.

### 3.4 降雪对量子通信系统信道误码率的影响分析

基于 BB84 协议的量子密钥分发系统, 定义量子误码率  $P_B$  为接收到的误码比特数  $P_e$  与总比特率  $P_s$  的比值<sup>[25]</sup>, 表示为

$$P_B = P_e / P_s. \quad (20)$$

令  $P_{\text{snow}}$  为由降雪导致的误码量子比特数, (20) 式变成

$$P_B = P_{\text{snow}} / P_s. \quad (21)$$

由文献<sup>[26]</sup> 得

$$P'_B = \frac{1}{2} \frac{S \tau n}{1 - \exp(-\mu T_c P_a T_a \eta_d F_m)}, \quad (22)$$

式中  $T_c$  为信道传输率, 且有

$$T_c = \exp(-\sigma \cdot L); \quad (23)$$

其他参数所表示的意义和取值如表 2 所列.

根据表 2 取值, 可得

$$P'_B = \frac{1}{2} \frac{S}{1 - \exp \left\{ -0.325 \exp \left[ -\frac{\pi N_0}{(25.5 S^{-0.48})^3} \cdot L \right] \right\}}. \quad (24)$$

对误码率  $P_B$ , 传输距离  $L$  和降雪强度  $S$  进行仿真分析, 结果见图 6. 当降雪量和传输距离增加, 信道误码率急剧上升. 当降雪强度为 5.5 mm/d, 传

输距离为 3.7 km 时, 信道误码率达到了 0.0275。据此可得, 降雪会影响量子通信误码率。

表 2 信道误码率各参数含义和取值

Table 2. Meaning and values of the parameters of the channel bit error rate.

参数	含义	取值
$\tau$	量子探测器时间窗口	1
$n$	探测器数目	1
$\mu$	平均光子数	1
$P_a$	单光子捕获率	0.5
$T_a$	系统装置传输率	1
$\eta_d$	单光子探测器效率	0.65
$F_m$	测量因子	1

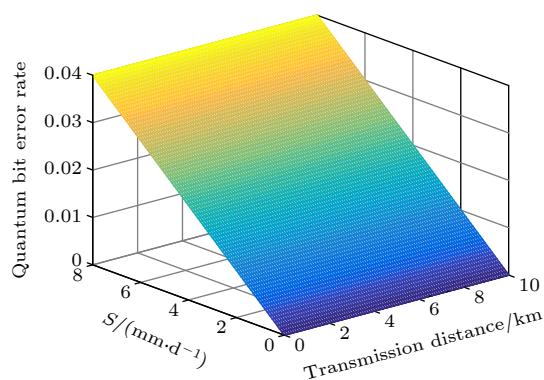


图 6 误码率与降雪强度、传输距离的关系

Fig. 6. Quantum bit error rate versus snowfall intensity and transmission distance.

## 4 结 论

本文对降雪背景下地表附近自由空间量子信道性能进行了分析。根据降雪的谱分布函数以及降雪的消光特性, 研究并分析了降雪与链路衰减、幅值阻尼信道容量、生存函数以及信道误码率之间的关系。由仿真分析可得, 降雪会影响自由空间量子通信性能。因此在进行量子通信时, 降雪的环境因素必须考虑, 需要根据降雪强度, 适当调整相关参数, 以减小降雪对量子通信的影响。

## 参考文献

- [1] Diamanti E, Lo H, Qi B, Yuan Z L 2016 *NPJ Quantum Inf.* **2** 16025
- [2] Smania M, Elhassan A, Tavakoli A, Bourennane M 2016 *NPJ Quantum Inf.* **2** 16010
- [3] Bäuml S, Azuma S, Kato G, Elkouss D 2020 *Commun. Phys.* **3** 55
- [4] Bhaskar M K, Riedinger R, Machielse B, Levonian D S, Nguyen C T, Knall E N, Park H, Englund D, Lončar M, Sukachev D D, Lukin M D 2020 *Nature* **580** 7801
- [5] Jin X M, Ren J G, Yang B, Yi Z H, Zhou F, Xu X F, Peng C Z, Wang S K, Yang D, Pan J W, Hu Y F, Jiang S 2010 *Nat. Photonics* **4** 376
- [6] Liao S K, Cai W Q, Handsteiner J, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 030501
- [7] Liao S K, Yong H L, Liu C, et al. 2017 *Nat. Photonics* **11** 509
- [8] Yin J, Li Y, Liao S, et al. 2020 *Nature* **582** 501
- [9] Nie M, Ren J M, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 190301 (in Chinese) [聂敏, 任家明, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2016 物理学报 **65** 190301]
- [10] Nie M, Tang S R, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 070302 (in Chinese) [聂敏, 唐守荣, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2017 物理学报 **66** 070302]
- [11] Nie M, Shang P G, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240303 (in Chinese) [聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2014 物理学报 **63** 240303]
- [12] Nie M, Wang Y, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 020303 (in Chinese) [聂敏, 王允, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2016 物理学报 **65** 020303]
- [13] Nie M, Wei R Y, Yang G, Zhang M L, Sun A J, Pei C X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 110301 (in Chinese) [聂敏, 卫容宇, 杨光, 张美玲, 孙爱晶, 裴昌幸 2019 物理学报 **68** 110301]
- [14] Liu X C, Gao T C, Liu L, Zhang W, Yang S C, Li T 2010 *J. Appl. Meteorol. Sci.* **21** 433 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 刘磊, 张伟, 杨树臣, 李涛 2010 应用气象学报 **21** 433]
- [15] Liu Y L, Ren G Y, Yu H M 2012 *Scientia Geographica Sin.* **32** 1176 (in Chinese) [刘玉莲, 任国玉, 于宏敏 2012 地理科学 **32** 1176]
- [16] Wolf D, David A 2001 *Radio Sci.* **36** 639
- [17] Gunn K L S, Marshall J S 1958 *J. Meteorol.* **10** 452
- [18] Sun X J, Wang X L, Li H, Li H, Zhang W X, Yan W 2009 *Atmospheric Observation* (1st Ed.) (Beijing: Meteorological Press) p68 (in Chinese) [孙学金, 王晓蕾, 李浩, 张伟星, 严卫 2009 大气探测学 (第1版) (北京: 气象出版社) 第68页]
- [19] Gao T C, Liu X C, Zhang Y T, Yang S C, Xiong C C 2011 *J. PLA Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.)* **12** 403 (in Chinese) [高太长, 刘西川, 张云涛, 杨树臣, 熊超超 2011 解放军理工大学学报 (自然科学版) **12** 403]
- [20] Song F H, Xu C L, Wang S M 2012 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **32** 110 (in Chinese) [宋飞虎, 许传龙, 王式民 2012 中国电机工程学报 **32** 110]
- [21] Yin H, Han Y 2013 *Quantum Communication Theory and Technology* (1st Ed.) (Beijing: Electronics Industry Publishing) pp76–83 (in Chinese) [尹浩, 韩阳 2013 量子通信原理与技术 (第1版) (北京: 电子工业出版社) 第76—83页]
- [22] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to Military Quantum Communication* (Beijing: Military Science Press) p227 (in Chinese) [尹浩, 马怀新 2006 军事量子通信概论 (北京: 军事科学出版社) 第227页]
- [23] Zhang L, Nie M, Liu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150301 (in Chinese) [张琳, 聂敏, 刘晓慧 2013 物理学报 **62** 150301]
- [24] Liu T K, Wang J S, Liu X J, Zhan M S 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 1449 (in Chinese) [刘堂昆, 王继锁, 柳晓军, 詹明生 2000 光学学报 **20** 1449]
- [25] Ma J, Zhang G Y, Tan L Y 2006 *Opt. Techn.* **32** 101 (in Chinese) [马晶, 张光宇, 谭立英 2006 光学技术 **32** 101]
- [26] Zhang G Y, Yu S Y, Ma J, Tan L Y 2007 *Opto-Electronic Engineering* **34** 126 (in Chinese) [张光宇, 于思源, 马晶, 谭立英 2007 光电工程 **34** 126]

# Influence of snowfall on free-space quantum channel near earth surface and parameter simulation\*

Nie Min<sup>1)</sup> Wang Chao-Xu<sup>1)†</sup> Yang Guang<sup>1)2)</sup> Zhang Mei-Ling<sup>1)</sup>  
Sun Ai-Jing<sup>1)</sup> Pei Chang-Xing<sup>3)</sup>

1) (School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, 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, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an 710071, China)

(Received 24 June 2020; revised manuscript received 13 September 2020 )

## Abstract

Quantum communication has the advantages of wide coverage and security, and is currently a hot research topic in the field of communication. In the process of free space quantum communication, quantum signals need transmitting at a certain height above the surface. Various environmental factors in free space, such as snowfall, sandstorms, rainfall, haze and floating dust, will inevitably affect quantum communication performance. However, so far, the influence of snowfall on the performance of quantum channels in free space near the surface has not been investigated. Thus, according to the intensity of snowfall, the snowfall is divided into four levels: light snow ( $S_1$ ), medium snow ( $S_2$ ), heavy snow ( $S_3$ ) and blizzard ( $S_4$ ). When the snow is falling in the air, it has an energy absorption effect on the light quantum signal, which is called the extinction effect. The different intensities of snow extinction have different effects on free space optical quantum signal. In this paper, first, a mathematical model for the extinction effects on optical quantum signal at different levels of snowfall is presented; then the quantitative relationship between snowfall and free space extinction attenuation, as well as the relationship between snowfall and channel limit survival function is established, channel capacities under different snowfall intensities, and quantum bit error rate are also given. Finally, the mathematical models of snowfall intensity, transmission distance and link attenuation, amplitude damping channel capacity, channel survival function and channel error rate are established. Simulation results show that when the snowfall intensity is 2.1 mm/d ( $S_1$ ) and the transmission distance is 2.2 km, the communication link attenuation is 0.0362, the channel capacity is 0.7745, the channel survival function is 0.2329, and the channel error rate is 0.0105. When the snowfall intensity is 3.8 mm/d ( $S_2$ ) and the transmission distance is 3.5 km, the communication link attenuation is 0.1326, the channel capacity is 0.4922, the channel survival function is 0.2099, and the channel error rate is 0.019. Thus, different snowfall intensity has different influence on the performance of free space quantum communication. Therefore, in practical applications, the communication parameters should be adjusted adaptively based on the snowfall intensity to improve the reliability of free space quantum communication.

**Keywords:** quantum communication, snowfall intensity, extinction coefficient, survival function

**PACS:** 03.67.Hk, 03.65.Yz, 42.50.Md

**DOI:** [10.7498/aps.70.20200972](https://doi.org/10.7498/aps.70.20200972)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61971348, 61201194), the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province, China (Grant No. 2015KW-013), and the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 16JK1711).

† Corresponding author. E-mail: [55197424@qq.com](mailto:55197424@qq.com)