

# 降雨背景下自由空间量子通信的性能研究

高 颀<sup>1</sup>, 聂 敏<sup>1</sup>, 杨 光<sup>1,2</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** 为了研究降雨对自由空间量子通信的影响,根据雨滴分布谱和 Mie 散射理论,研究了降雨强度对消光系数的影响,提出了光子衰减、信道容量与降雨强度的关系,建立了信道生存函数、传输距离的计算模型,并进行了系统性能参数的仿真。结果表明,在忽略大气气溶胶等其他粒子影响的情况下,当降雨强度为 1.46 mm/h,传输距离为 3 km 时,光子衰减为初始能量的 50%,信道容量为 0.2702,信道生存函数为 0.9122,信道误码率为  $1.8 \times 10^{-8}$ 。由此可见,降雨对自由空间量子通信的信道容量、生存函数、误码率有不同程度的影响。因此,为了提高自由空间量子通信的可靠性,应根据降雨强度,自适应调整通信系统的各项参数。

**关键词** 量子光学; 量子通信; 消光系数; 降雨强度; 误码率; 生存函数

中图分类号 G301 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.012701

## Performance of Free-Space Quantum Communication in Context of Rainfall

Gao Kun<sup>1</sup>, Nie Min<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1,2</sup>, Pei Changxing<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and  
Telecommunication, 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, Xi'an University of Electronic Science and  
Technology, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** To figure out the effect of rainfall on the free space quantum communication, the effect of rainfall intensity on extinction coefficient is discussed based on the theory of the distribution of raindrops and the Mie scattering theory. The relationship between photon attenuation, channel capacity and rainfall intensity is proposed. The calculation model of channel survival function and transmission distance is established. And the performance parameters of the system are simulated. Simulation results show that, without considering the effect of atmospheric aerosol particles and other circumstances, when the rainfall intensity is 1.46 mm/h, the transmission distance is 3 km, the initial energy of the photon decreases to 50%, the channel capacity is 0.2702, the channel value of the survival function is 0.9122 and the error rate of channel is  $1.8 \times 10^{-8}$ . Thus, the rainfall has different influences on the performance of free space quantum communication, including the cavity of the channel, the survival function and the error rate. Therefore, the parameters should be adjusted adaptively based on the rainfall intensity to improve the reliability of free space quantum communication.

**Key words** quantum optics; quantum communication; extinction coefficient; rainfall intensity; error rate; survival function

**OCIS codes** 270.5565; 010.1290

收稿日期: 2016-09-19; 收到修改稿日期: 2016-09-20; 网络出版日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金(2014JQ8318)、陕西省国际科技合作与交流计划项目(2015KW-013)

作者简介: 高 颀(1992—),男,硕士研究生,主要从事量子通信、移动通信方面的研究。E-mail: 407566862@qq.com

导师简介: 聂 敏(1964—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事量子通信、移动通信、现代通信网理论和关键技术方面的研究。E-mail: niemin@xupt.edu.cn

## 1 引言

量子通信具有安全、高效的优点,在军事、金融等领域有着重大的应用价值。自由空间量子通信作为量子通信的一种形式,是构建全球量子通信网的重要组成部分,已成为当下研究的热点。德国海德堡大学的研究人员通过充分利用地磁场“钟态”的不敏感特性和增加自旋波的波长来抑制退相干<sup>[1]</sup>,将量子存储器的存储时间延长到 1 ms,朝着实现远距离量子通信的目标又迈进了一步;澳大利亚维也纳大学的研究员通过量子中继实现了横跨多瑙河的量子隐形传态传输<sup>[2]</sup>,为高效、远距离量子通信和量子网络的实现提供了基础。星地量子信息传输,是一种自由空间量子通信,2008 年欧洲研究团队进行了星地量子通信实验<sup>[3]</sup>,从地面向高度为 1485 km 的低轨道卫星发出弱光脉冲,再由卫星上的角反射器反射光脉冲至地面接收机,这一技术开创了星地量子卫星通信的先河。

在国内,2008 年,潘建伟小组实现了由 300 m 光纤连接的两个原子系统间的纠缠<sup>[4]</sup>,于 2010 年成功完成了自由空间 16 km 量子隐形传态的实验<sup>[5]</sup>;并于 2016 年 8 月发射了全球首颗量子通信卫星。孙颖等<sup>[6]</sup>提出了基于量子存储和纠缠光源(EPS)的测量设备无关量子密钥分配协议及其网络模型,弥补了直接预报量子存储方案需要预报存储器的不足。王中结等<sup>[7]</sup>基于振幅衰减噪声模型,提出一种基于免退纠缠态和量子错误避免代码技术的量子隐形传态方案,该方案的优点是隐形传输具有非常高的保真度,并且具有 100% 的成功率,对改善量子通信有重要的作用。赵顾颖等<sup>[8]</sup>提出了一种基于双光纤布拉格光栅的量子密钥分发滤波方案,可有效地滤除副载波复用量子密钥分发系统中信号频率以外的互调边带,从而降低了量子误码率。

当进行自由空间量子通信时,量子态不可避免地会受到大气湍流、雾霾、降雨等自然环境因素的影响。南非 CSIR 的研究员 Roux<sup>[9]</sup>推导出纠缠双光子态通过大气湍流时的轨道角动量退相干的一阶微分方程,可用于描述纠缠光子在大气湍流中的衰减规律;聂敏等<sup>[10]</sup>研究了 PM2.5 对自由空间量子光信号的传输影响,为量子光信号在 PM2.5 情况下传输时参数的调整提供了依据;文献<sup>[11]</sup>研究了降雨对采用诱骗态协议的量子通信系统的影响,提出了基于变色龙算法的脉冲平均光子数自适应策略,提高了量子通信系统在降雨环境下的有效性和可靠性。

目前,研究降雨对自由空间量子通信性能的影响是保证量子通信在降雨环境下正常进行的关键,而降雨对自由空间量子通信性能的影响尚有许多问题未得到深入研究。降雨环境下,雨滴对光的吸收和散射所产生的消光效应<sup>[12]</sup>是影响光量子传输的主要因素。因此,本文根据降雨雨滴的分布谱和 Mie 散射理论,研究了降雨消光系数与降雨强度之间的关系,进而分析了光子能量衰减与降雨强度的关系,建立了量子通信信道容量、信道生存函数以及信道误码率与降雨强度的定量关系,并对其进行仿真,为降雨环境下自由空间量子通信的正常运行提供了理论依据。

## 2 降雨对光量子能量的影响

单位时间内的降雨量称为降雨强度,降雨等级可以依据表 1 进行划分<sup>[13]</sup>。

表 1 降雨强度划分标准

Table 1 Criteria for classification of rainfall intensity

Rainfall intensity level	Light rain	Moderate rain	Heavy rain	Rainstorm	Torrential rain	Extraordinary rainstorm
Rainfall intensity / (mm/h)	<0.41	0.41~1.04	1.04~2.08	2.08~4.16	4.16~8.33	>8.33

常用的雨滴分布谱有 MP 分布<sup>[14]</sup>、Gamma 分布和 Joss 分布等,其中 MP 雨滴分布有一般雨滴谱的特点,能够比较好地描述雨滴的平均尺度分布,因此本文采用 MP 雨滴谱进行研究。MP 雨滴谱形式可表示为

$$N(D) = N_0 \exp(-\Delta D), \quad (1)$$

式中  $D$  为雨滴直径,通常在 0.1~0.8 mm 之间; $N_0$  为浓度参数,取为  $8000 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ; $\Delta$  为尺度参数,取为  $4.1R^{-0.21} \text{ mm}^{-1}$ ,其中  $R$  为降雨强度,单位为 mm/h。

应用 Mie 散射理论,雨滴消光系数可以表示为<sup>[15-16]</sup>

$$\sigma_{\text{ext}} = 4343 \cdot \int_{D_0}^{D_1} \frac{\pi}{4} D^2 \cdot Q_e \cdot N(D) dD, \quad (2)$$

式中  $Q_e$  为消光率因子<sup>[14]</sup>,  $\sigma_{\text{ext}}$  单位为 dB/km。因为雨滴半径远大于光子波长,故可认为消光率因子  $Q_e=2$ 。

对消光系数与降雨强度的关系进行仿真,仿真结果如图 1 所示。图中横坐标代表降雨强度  $R$ ,纵坐标代表消光系数  $\sigma_{\text{ext}}$ 。可以看出,随着降雨的发生,消光系数  $\sigma_{\text{ext}}$  首先急剧增加,伴随着降雨强度的增加,消光系数的增加速率越来越慢,在降雨强度为 0.4 mm/h(小雨)时,消光系数已经达到了 4 dB/km,由此可见,降雨会对光量子信号的传输效率产生不容小觑的影响。

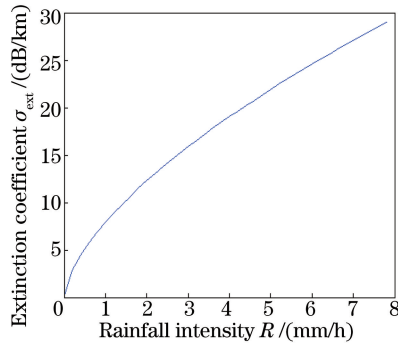


图 1 消光系数与降雨强度之间的关系

Fig. 1 Relationship between extinction coefficient and rainfall intensity

根据 Bougure 定律<sup>[17]</sup>,光子能量  $E$  与  $\sigma_{\text{ext}}$  的关系可表示为

$$E = E_0 \exp(-\sigma_{\text{ext}} \cdot L), \quad (3)$$

式中  $E_0$  为光子初始能量,  $L$  为传输距离。光子能量  $E$  可以写为

$$E = h \frac{c}{\lambda}, \quad (4)$$

式中  $h$  为普朗克常量,近似为  $6.6 \times 10^{-34}$  J·s,  $c$  为光速,  $\lambda$  为波长。

以  $0.86 \mu\text{m}$  光量子信号为例,其初始能量  $E=2.3 \times 10^{-6}$  J,忽略大气气溶胶等其他粒子的影响,对信号能量  $E$  与降雨强度  $R$ 、传输距离  $L$  之间的关系进行仿真,仿真结果如图 2 所示。图中  $E$  轴为光子能量,  $R$  轴为降雨强度,  $L$  轴为传输距离,可以看出当  $R$  为 0 时,忽略气溶胶等其他粒子的影响,此时为理想信道,其中的光子能量几乎无损耗;随着降雨的发生,光子能量迅速衰减,当降雨强度为 1.46 mm/h(大雨)时,传输距离为 3 km 时,能量衰减为  $1.15 \times 10^{-6}$  J,几乎衰减了一半,可见降雨会严重影响光量子的能量传输效率,进而影响自由空间量子通信的可靠性。

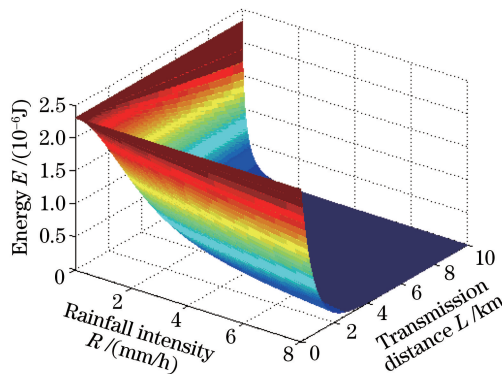


图 2 光子能量与降雨强度、传输距离之间的关系

Fig. 2 Photon energy versus rainfall intensity and transmission distance

### 3 降雨对量子通信信道容量的影响

降雨主要引起光子能量的衰减,造成光子频率变化,使得传输信息不能被接收方正确接收,间接意味着光子丢失,从而影响量子通信系统的性能。这里选取幅值阻尼信道作为量子噪声信道模型,研究降雨对量子通信信道容量的影响。

设降雨量子态为 $|e_1\rangle$ ,其以丢失一个能量量子的概率从真空态跃迁到有一个光子的状态 $|e_x\rangle$ ,进行自由空间量子通信时,降雨与量子态组成的复合系统上的么正演化 $U$ 可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} |0\rangle|e_1\rangle \rightarrow |0\rangle|e_1\rangle \\ |1\rangle|e_1\rangle \rightarrow \sqrt{1-p}|1\rangle|e_1\rangle + \sqrt{p}|0\rangle|e_x\rangle \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $p$ 为量子态为 $|e_x\rangle$ 的概率。由此可以得到

$$U(|\phi_A\rangle|e_1\rangle) = (\alpha|0\rangle + \sqrt{1-\gamma}\beta|1\rangle)|e_1\rangle + \sqrt{\gamma}\beta|0\rangle|e_x\rangle, \quad (6)$$

式中 $\alpha$ 和 $\beta$ 为复数, $|\alpha|^2$ 为状态 $|0\rangle$ 的概率, $|\beta|^2$ 为状态 $|1\rangle$ 的概率,且 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , $\lambda$ 为丢失一个光子的概率。对降雨光子态 $|e_1\rangle$ 求偏迹,可以得到幅值阻尼信道的运算元为

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\gamma} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{\gamma} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

幅值阻尼信道的运算元为

$$\mathbf{E}_k = \sum_n \sqrt{\binom{n}{k}} \sqrt{(1-\gamma)^{n-k} \gamma^k} |n-k\rangle\langle n|, \quad (8)$$

式中 $|k\rangle, \langle n|$ 分别为降雨与量子系统湮灭算子的本征态。

对于一个单光子比特状态 $\rho = \begin{bmatrix} a & b \\ b^* & c \end{bmatrix}$ ,经过幅值阻尼信道,状态将变为

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

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

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

对应的冯诺依曼熵为<sup>[19]</sup>

$$s\left[\varepsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right)\right] = -\{[p_1 + (1-p_1)\gamma] \text{lb}[p_1 + (1-p_1)\gamma] + (1-p_1)(1-\gamma)^2 \text{lb}(1-p_1)\}, \quad (11)$$

式中 $p_i$ 为信源取 $\rho_i$ 时的概率,则幅值阻尼信道的信道容量为

$$C = -\{[p_1 + (1-p_1)\gamma] \text{lb}[p_1 + (1-p_1)\gamma] + (1-p_1)(1-\gamma)^2 \text{lb}(1-p_1)\} - (1-p_1)H_2(\gamma), \quad (12)$$

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

由光子能量 $E$ 与降雨消光系数 $\sigma_{\text{ext}}$ 的关系可以得到,在降雨环境中光子丢失的概率可以表示为

$$\gamma = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \exp(\sigma_{\text{ext}} \cdot L). \quad (13)$$

对幅值阻尼信道的容量 $C$ 、降雨强度 $R$ 和传输距离 $L$ 的关系进行仿真,仿真结果如图3所示。图中 $C$ 轴为信道容量, $R$ 轴为降雨强度, $L$ 轴为传输距离。可以看出,随着降雨强度和传输距离的增加,信道容量减小。当降雨强度和传输距离为0时,此时为理想信道,信道容量为1;当降雨强度为0.25 mm/h时,此时为小雨,传输距离为4 km,信道容量为0.5。由此可见,降雨对信道容量的影响较大,应根据降雨强度,增加量子通信的带宽或增大光子信号的发射功率,提高量子通信的可靠性。

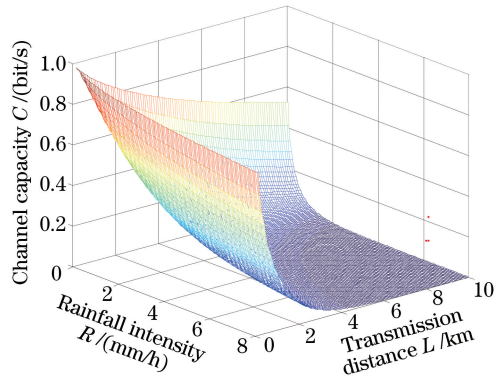


图3 信道容量与降雨强度、传输距离之间的关系

Fig. 3 Channel capacity versus rainfall intensity and transmission distance

#### 4 降雨对量子通信信道生存性的影响

信道生存性是描述信道受到外界因素干扰,继续维持业务状态能力的物理量,可用生存函数来表征<sup>[20]</sup>

$$S = \xi \cdot F, \quad (14)$$

式中  $F$  为保真度,是描述量子初始状态接近传输后状态的程度的物理量。 $\xi$  为生存系数,与信道所处环境有关,降雨情况下可以表示为

$$\xi = 5809/5810 - 9\sigma_{\text{ext}}/2905. \quad (15)$$

降雨情况下,量子态经自由空间传输后,信道的生存函数可以定义为

$$S = \xi \cdot F = \xi \cdot F \left[ \sum_i p_i \rho_i, \epsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \right] = \xi \cdot \text{tr} \left\{ \left[ \left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{1/2} \cdot \epsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) \times \left( \sum_i p_i \rho_i \right)^{1/2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (16)$$

以幅值阻尼信道为例,(16)式中  $\epsilon \left( \sum_i p_i \rho_i \right) = \begin{bmatrix} p_1 + (1-p_1)\gamma & 0 \\ 0 & (1-p_1)(1-\gamma) \end{bmatrix}$ , 所以幅值阻尼信道的信道生存函数为

$$S = \xi \cdot F = \xi \cdot \{ p_1 [p_1 + (1-p_1)\gamma] \}^{1/2} + (1-p_1)\sqrt{1-\gamma}, \quad (17)$$

式中  $\gamma = 1 - \exp(-\sigma_{\text{ext}} \cdot L)$ ,  $p_1$  为信源取  $\rho_1$  的概率。

忽略大气气溶胶等其他粒子的影响,只考虑降雨对信道生存函数的影响。在信源  $\rho_1$  概率为 0.5 的情况下,对信道生存函数、降雨强度和传输距离的关系进行仿真,结果如图 4 所示。图中  $S$  轴为信道生存函数, $R$  轴为降雨强度, $L$  轴为传输距离。可以看出,当降雨强度  $R=0$  时,忽略大气气溶胶等其他粒子的影响,此时自由空间为理想信道,信道生存函数  $S=1$ ;随着降雨强度和传输距离的增加,信道维持业务的能力降低,信道生存函数值呈指数衰减,并且逐渐趋于  $S=0.7$ ,应根据降雨强度,增加量子的耦合强度、失谐量等相关参数<sup>[21]</sup>,或者采用变色龙算法调整发送端脉冲的平均光子数,提高量子信息的保真度,增强量子信息的生存性。

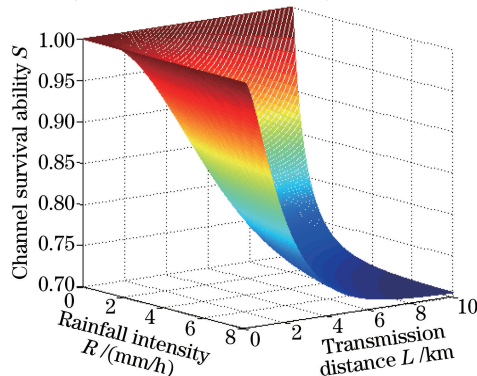


图4 信道生存函数与降雨强度、传输距离之间的关系

Fig. 4 Channel survival ability versus rainfall intensity and transmission distance

## 5 降雨对量子通信信道误码率的影响

对自由空间进行量子通信时,通信系统的误码率主要由光学元件、探测器暗噪声和空间环境(信道)组成。不考虑前两种因素,只考虑降雨对信道误码率的影响。

量子误码率定义为接收到的误码比特数与总比特数的比率<sup>[22]</sup>,即为

$$R_B = \frac{B_{\text{error}}}{B_{\text{sift}}} \quad (18)$$

基于 BB84 量子密钥分配系统,将降雨引起的误码的量子比特数记为  $B_{\text{rain}}$ ,则降雨引起的误码率为

$$R'_B = \frac{B_{\text{rain}}}{B_{\text{sift}}} \quad (19)$$

由文献[23]得

$$R'_B = \frac{1}{2} \times \frac{R\tau n}{1 - \exp(-\mu T_c P_a T_a \eta_d F_m)}, \quad (20)$$

式中  $\tau$  为量子探测器的时间窗口,  $n$  为探测器数目,  $\mu$  为平均光子数,  $P_a$  为单光子捕获率,  $T_a$  为系统装置传输率,  $\eta_d$  为单光子探测器效率,  $F_m$  为测量因子,对于 BB84 系统,  $F_m = 1$ ,  $T_c$  为降雨条件下量子信道的传输率,可以表示为

$$T_c = \exp(-\sigma_{\text{ext}} \cdot L) \quad (21)$$

取  $\tau = 1 \text{ ns}$ ,  $n = 1$ ,  $\mu = 1$ ,  $P_a = 0.5$ ,  $T_a = 1$ ,  $\eta_d = 0.65$ ,  $F_m = 1$ ,对误码率  $R_B$ 、降雨强度  $R$  和传输距离  $L$  之间的关系进行仿真,结果如图 5 所示。图中  $R_B$  轴为信道误码率,  $R$  轴为降雨强度,  $L$  轴为传输距离。可以看出当降雨强度  $R = 0$ ,此时为理想信道,误码率  $R_B = 0$ ;随着降雨强度和传输距离的增加误码率逐渐增加,但当降雨强度  $R < 5.75 \text{ mm/h}$  时,误码率保持极小值,几乎趋于零;当降雨强度  $R = 7 \text{ mm/h}$ (暴雨),传输距离为  $8.65 \text{ km}$  时,误码率为  $0.001$ 。由此可知降雨对量子通信信道误码率的影响非常小,在常见的降水天气下,  $R < 4.16 \text{ mm/h}$ ,降雨几乎不会引起光量子比特误码。

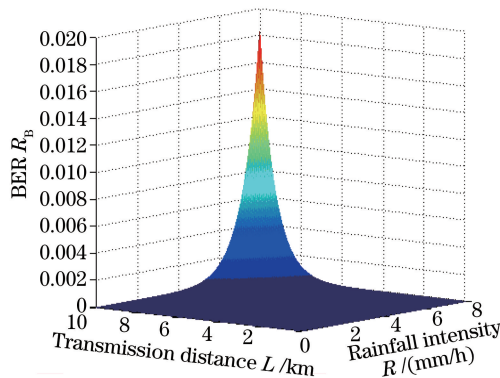


图 5 误码率与降雨强度、传输距离之间的关系

Fig. 5 Bit error rate versus rainfall intensity and transmission distance

## 6 结 论

本文研究了降雨对自由空间量子通信的影响,根据雨滴的分布谱和 Mie 散射理论,研究了降雨与光子能量、自由空间量子通信信道容量、信道生存性和信道误码率之间的关系。结果表明,随着降雨强度和量子通信距离的改变,量子通信中各项通信性能的指标都发生了不同的改变。其中,降雨对光子能量和信道容量的影响尤为明显。因此,降雨背景下进行自由空间量子通信时,需要根据降雨强度和通信的距离,自适应调整量子通信系统中通信带宽、发射功率、量子耦合度、量子失谐量等相关参数,采用变色龙算法调整发送端脉冲平均光子数,以降低降雨对量子通信的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao B, Chen Y A, Bao X H, *et al.* A millisecond quantum memory for scalable quantum networks[J]. Nature

- Physics, 2009, 5(2): 95-99.
- [2] Ursin R, Jennewein T, Aspelmeyer M, *et al.* Communications: quantum teleportation across the Danube[J]. Nature, 2004, 430(7002): 849.
- [3] Villoresi P, Jennewein T, Tamburini F, *et al.* Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and Earth[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(3): 033038.
- [4] Yuan Z S, Chen Y A, Zhao B, *et al.* Experimental demonstration of a BDCZ quantum repeater node[J]. Nature, 2008, 454(7208): 1098-1101.
- [5] Jin X M, Ren J G, Yang B, *et al.* Experimental free-space quantum teleportation[J]. Nature Photonics, 2010, 4(6): 376-381.
- [6] Sun Ying, Zhao Shanghong, Dong Chen. Measurement device independent quantum key distribution network based on quantum memory and entangled photon sources[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0327001.  
孙颖, 赵尚弘, 东晨. 基于量子存储和纠缠光源的测量设备无关量子密钥分配网络[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0327001.
- [7] Wang Zhongjie, Ruan Fei, Fang Xu. Teleportation for atomic state based on disentanglement-free state[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0327001.  
王中结, 阮飞, 方旭. 基于免退纠缠态的原子态隐形传输[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0327001.
- [8] Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.* Quantum key distribution analysis for filtering scheme based on double fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0918001.  
赵顾颢, 赵尚弘, 幺周石, 等. 基于双光纤布拉格光栅滤波的量子密钥分发误码率分析[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0918001.
- [9] Roux F S. Infinitesimal-propagation equation for decoherence of an orbital-angular-momentum-entangled biphoton state in atmospheric turbulence[J]. Physical Review A, 2011, 83(5): 053822.
- [10] Nie Min, Ren Jie, Yang Guang, *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.
- [11] Nie Min, Wang Yun, Yang Guang, *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.
- [12] Rasmussen R M, Vivekanandan J, Cole J, *et al.* The estimation of snowfall rate using visibility[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(10): 1542-1563.
- [13] Ji Xiang. Rainfall is how to divide(Knowledge of science and technology)[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2002(3): 19.  
吉祥. 降雨量是怎样划分的(科技知识)[J]. 湖南农机, 2002(3): 19.
- [14] Li Weimin, Ao Faliang, Yu Shengyun. Study of forward scattering effects on laser transformation in raindrop[J]. Photon Technology, 2006(4): 237-240.  
栗伟珉, 敖发良, 于胜云. 雨滴前向散射对光传输影响的研究[J]. 光子技术, 2006(4): 237-240.
- [15] Bachelard R, Bender H, Courteille P W, *et al.* Role of Mie scattering in the seeding of matter-wave superradiance[J]. Physical Review A, 2012, 86(4): 043605.
- [16] Wang Han, Zhang Tao. 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.
- [17] Song Feihu, Xu Chuanlong, Wang Shimin. Multi-parameters measurement for liquid column based on rainbow technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 110-116.  
宋飞虎, 许传龙, 王式民. 基于彩虹技术的吸收性液滴多参数测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 110-116.
- [18] Yin Hao, Ma Huaixin. Introduction to military quantum communication[M]. Beijing: Military Science Press, 2006:

227.

尹 浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 227.

- [19] Yin Hao, Han Yang. Quantum communication theory and technology [M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 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.

- [20] Zhang Lin, Nie Min, Liu Xiaohui. 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.

- [21] Sheng Peng. Fidelity of quantum information[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006: 24-50.

盛 鹏. 量子信息的保真度[D]. 上海: 上海大学, 2006: 24-50.

- [22] Ma Jing, Zhang Guangyu, Tan Liying. Analysis of quantum bit error rate based on single photon source with Poisson distribution[J]. Optical Technique, 2006, 32(1): 101-104.

马 晶, 张光宇, 谭立英. 基于泊松分布单光子源的量子误码率的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 101-104.

- [23] Zhang Guangyu, Yu Siyuan, Ma Jing, *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.