

# 海洋气溶胶对自由空间量子通信性能影响

张秀再<sup>1,2\*</sup>, 徐茜<sup>2</sup>, 刘邦宇<sup>2</sup>, 周丽娟<sup>2</sup>, 张晨<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** 海洋气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分之一,为了研究海洋气溶胶对量子通信的影响,根据海洋气溶胶粒子的尺度谱分布以及消光系数,分析海洋气溶胶粒子浓度和传输距离与链路衰减之间的定量关系,研究粒子浓度、传输距离与信道容量、信道保真度及信道误码率之间的关系并进行仿真模拟。仿真结果表明,当传输距离为 8 km,海洋气溶胶粒子浓度分别为  $300/\text{m}^3$  和  $500/\text{m}^3$  时,对应的链路衰减、信道容量和信道误码率分别为 0.407 dB/km 和 0.679 dB/km、0.423 bit/s 和 0.349 bit/s、0.027 和 0.092,当海洋气溶胶粒子浓度为  $500/\text{m}^3$ ,传输距离分别为 5 km 和 7 km 时,对应的信道保真度分别为 0.911 和 0.849。结果表明海洋气溶胶对自由空间量子通信的各项性能均有不同程度的影响。因此,当实际进行量子通信时,应根据海洋气溶胶粒子的浓度来调整各项性能参数以保证通信正常进行。

**关键词** 量子光学; 海洋气溶胶; 量子通信; 消光系数; 链路衰减; 退极化信道

**中图分类号** TN929.1; O436.2

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202040.2027001

## Influence of Marine Aerosols on Performance of Free-space Quantum Communication

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

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

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

**Abstract** Marine aerosols are important components of atmospheric aerosols. In order to study their impact on quantum communication, for a given transmission distance we have therefore analyzed the dependence of the link attenuation on the concentration, size-spectrum distribution, and extinction coefficients of the marine aerosol particles. In particular, we have studied and simulated the quantitative relationships of particle concentrations and transmission distance on the link attenuation, channel capacity, channel fidelity, and channel error rate. The simulation results show that when the transmission distance is 8 km and the ocean aerosol particle concentration is  $300/\text{m}^3$  and  $500/\text{m}^3$ , the corresponding link attenuation, channel capacity, and channel bit error rate are 0.407 dB/km and 0.679 dB/km, 0.423 bit/s and 0.349 bit/s, 0.027 and 0.092, respectively. When the concentration of ocean aerosol particles is  $500/\text{m}^3$  and the transmission distance is 5 km and 7 km, the corresponding channel fidelity is 0.911 and 0.849, respectively. Ocean aerosols thus have varying degrees of influence on the performance of free-space quantum communication. In actual quantum communication, various performance parameters must therefore be adjusted according to the concentration of the ocean aerosol particles in order to ensure normal communication.

**Key words** quantum optics; marine aerosol; quantum communication; extinction factor; link attenuation; depolarization channel

**OCIS codes** 270.5565; 270.5585

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-06-29; 录用日期: 2020-07-10

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

\* E-mail: zxzhering@163.com

## 1 引 言

量子保密通信结合了现代通信技术和量子信息技术,利用量子态所具有的特殊叠加状态特性和不可复制性实现了量子密钥分发,进而建立了安全通信密码,并基于一次一密的加密体制实现了无条件安全的数据传输<sup>[1]</sup>。近年来,量子通信是发展势头良好的全新技术,已成为未来各国发展信息技术的重点。2004年,我国科研小组实现了量子密钥分配,且传输距离达到125 km。2007年,美国科学家使用了相距1 m的离子阱中的两个独立原子,实现量子纠缠和远距离的量子通信<sup>[2-3]</sup>。2008年,意大利和奥地利科学小组识别出了距离地球1500 km的人造卫星上反弹回地球的单批光子,在太空保密信息传输上有重大突破<sup>[4]</sup>。2013年,我国科学研究院完成了星地密钥分配实验,并建设了相关的控制点和用户节点,从此时开始量子通信技术正式应用于太空实验中<sup>[5-6]</sup>。量子保密通信将量子力学与信息论技术有效结合,通过高精度的量子测量技术及高精度的量子计算技术来计算、编码及信息传递。文献[7]针对传统的量子密钥分配协议未考虑非对称信道的问题,研究了基于指示单光子源的非对称信道的测量设备无关量子密钥分配协议的性能参数。文献[8]提出并设计了一种基于波长-模式双复用的量子保密通信系统,较好地保护了量子-经典信号同传过程中的量子信号。

在自由空间量子通信的过程中,考虑到通信的安全性,选取光信号作为量子信号。当传输光信号时,大气中存在各种各样的物质会对光信号起到散射消光等作用。文献[9]研究了大气雾霾对自由空间量子态传输的影响,为雾霾条件下量子态地自适应补偿提供了理论参考。文献[10]研究了暴风雪天气对自由空间量子通信信道的影响,为暴风雪天气下量子通信系统中各项参数的调整提供了理论依据。文献[11]研究了PM<sub>2.5</sub>大气污染对自由空间量子光信号传输的影响,为PM<sub>2.5</sub>大气污染状况下量子通信的正常进行提供了参考依据。目前,国内外学者对于海洋气溶胶背景下量子通信各性能的变化鲜有研究。

海洋气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分之一,其是通过海浪破碎后进入海洋上空的大气中而形成的。作为云凝结核参与云的组成部分之一,海洋气溶胶直接或间接地影响地气系统的辐射平衡和气候变化<sup>[12]</sup>。海洋气溶胶与陆地气溶胶的相互输送,极大地造成沿海地区酸沉降。王珉等研究发现

海洋气溶胶可以向陆地输送数公里至数百公里,其中海盐气溶胶及其释放出的卤素会影响沿海地区的大气反应过程,并由此对陆地环境施加影响<sup>[13]</sup>。海洋气溶胶粒子的散射和消光作用会导致海洋上空的空气污浊,能见度降低。王菲菲<sup>[14]</sup>对海洋大气气溶胶粒子数密度谱的谱型进行了分析,研究相对湿度和风速对粒子数密度谱的影响,并且统计典型海域的大气气溶胶消光和吸收特性,分析各参数之间的相互关系。孙琦云等<sup>[15]</sup>研究发现了海洋型气溶胶粒子的散射强度随着入射波长的增大而减小,消光效率因子随着波长的增大而减小,且消光以散射为主。因此,分析不同浓度下海洋气溶胶粒子的消光特性及其在自由空间对量子通信各项性能的影响具有重要意义。

本文根据海洋气溶胶粒子的分布函数,研究海洋气溶胶粒子的消光系数与粒子浓度之间的关系,分析量子信道链路衰减的变化并进行仿真模拟;针对退化信道,分别建立粒子浓度与信道容量及保真度之间的定量关系,并进行仿真模拟;分析信道误码率在粒子浓度和传输距离影响下的变化,为海洋气溶胶影响下量子通信的正常进行奠定理论基础。

## 2 海洋气溶胶对链路衰减的影响

气溶胶粒子的性质与形状、粒度、组分和尺度分布等参数有关。海洋气溶胶粒子的尺度参数可表示为

$$x = 2\pi r / \lambda, \quad (1)$$

式中: $x$ 为尺度参数,使得粒子的概率分布参数化; $r$ 为海洋气溶胶粒子的半径,单位为 $\mu\text{m}$ ; $\lambda$ 为入射光的波长,单位为 $\mu\text{m}$ 。

根据尺度参数,散射过程按照性质不同可以分为三类:当 $x \leq 0.1$ 时,为瑞利散射;当 $0.1 < x \leq 50.0$ 时,为米氏(Mie)散射;当 $x > 50.0$ 时,为几何光学散射。海洋气溶胶粒子的尺度参数介于 $0.1 \sim 50.0$ ,符合Mie散射的应用条件<sup>[16]</sup>,因此实验采用Mie散射来计算海洋气溶胶的消光特性。

海洋气溶胶的尺寸分布函数可以用对数正态分布函数来表示<sup>[17]</sup>,表达式为

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi \ln 10} \cdot r \cdot \ln \sigma_{\text{gm}}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln r - \ln r_{\text{gm}})^2}{2 \ln^2 \sigma_{\text{gm}}} \right], \quad (2)$$

式中: $N_0$ 为海洋气溶胶粒子数的浓度; $r_{\text{gm}}$ 为几何平均半径,单位为 $\mu\text{m}$ ; $\sigma_{\text{gm}}$ 为几何标准偏差。尺度谱参数的典型值如表1所示<sup>[18]</sup>。

表 1 气溶胶尺度谱参数的典型值

Table 1 Typical values of aerosol scale spectrum parameters

Parameter	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
$r_{gm}/\mu\text{m}$	0.3000	0.5000	0.0118	0.0500
$\sigma_{gm}$	2.5100	2.9900	2.0000	2.9900

海洋气溶胶粒子对可见光具有吸收和散射等作用,当在大气中传输时,能量不可避免地受到海洋气溶胶粒子的作用而产生不同程度的衰减。因此,分析可见光传输下海洋气溶胶粒子的消光特性对量子通信性能变化的研究具有重要意义。海洋气溶胶粒子的消光系数<sup>[19]</sup>可表示为

$$k_{\text{ext}} = \pi \int_{r_1}^{r_2} Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr, \quad (3)$$

式中: $r_1$  和  $r_2$  分别为海洋气溶胶粒子半径的下限和上限; $m$ 为海洋气溶胶粒子的复折射率; $Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda)$

为海洋气溶胶粒子的消光效率因子<sup>[19]</sup>,可表示为

$$Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (4)$$

式中: $n$  为海洋气溶胶粒子数; $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 系数<sup>[20]</sup>;  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部。

由国际气象学与大气物理学协会提出的大气气溶胶标准辐射大气模型,可以得到各类型气溶胶粒子的复折射率<sup>[21]</sup>,海洋气溶胶粒子的复折射率如表 2 所示。

表 2 4 种类型气溶胶粒子的复折射率

Table 2 Complex refractive index of 4 types of aerosol particles

Wavelength /nm	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
400	$1.385 - 9.9 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.6 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 5.0 \times 10^{-3}i$
488	$1.382 - 6.4 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.5 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 5.0 \times 10^{-3}i$
550	$1.381 - 4.3 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.4 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 6.0 \times 10^{-3}i$
694	$1.376 - 5.0 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.3 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 7.0 \times 10^{-3}i$

实验选取的  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 。当光信号在星地之间传输时,由海洋气溶胶导致的能量衰减可表示为<sup>[22]</sup>

$$E = E_0 \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d), \quad (5)$$

式中: $E$  为量子信号传输后的能量; $E_0$  为量子信号的初始能量; $d$  为传输距离。对(5)式取对数,可得到链路衰减因子为

$$L_{\text{att}} = 10k_{\text{ext}} \cdot \lg e \cdot d. \quad (6)$$

忽略大气中其他粒子的影响,链路衰减因子与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系如图 1 所示。从图 1 可以看到,当传输距离保持不变时,随着粒子浓度的增加,散射强度逐渐增大,导致能量衰减速度增加,链路衰减因子呈上升趋势,且在  $N_0 = 600/\text{m}^3$  和  $d = 10 \text{ km}$ ,链路衰减因子达到最大,值为  $1.018 \text{ dB/km}$ ;当粒子浓度一定时,传输距离逐渐增加,链路衰减因子随之增大。当传输距离为  $6 \text{ km}$  时,粒子浓度从  $250/\text{m}^3$  增加至  $500/\text{m}^3$ ,链路衰减因子从  $0.254 \text{ dB/km}$  增加至  $0.509 \text{ dB/km}$ 。当传输距离为  $8 \text{ km}$  时,粒子浓度从  $300/\text{m}^3$  增加至  $500/\text{m}^3$ ,链路衰减因子从  $0.407 \text{ dB/km}$  增加至  $0.679 \text{ dB/km}$ 。因此,随着海洋气溶胶粒子浓度的增加,传输距离越来越远,量子通信链路的传输会受到极大的影响,可以根据粒子浓度的高低来调整发送端

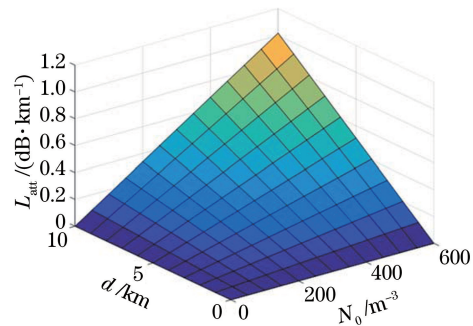


图 1 链路衰减与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系

Fig. 1 Relationship between link attenuation and ocean aerosol particle concentration and transmission distance

脉冲的平均光子数,降低链路衰减,提高通信质量。

### 3 海洋气溶胶对量子通信信道容量的影响

当光信号在大气中传播时,不可避免地受到环境的影响,光子态与环境量子态的相互作用会在一定程度上发生改变,从而导致退相干。实验选取退极化信道来研究海洋气溶胶对信道容量的影响。

对于退极化信道,一个量子系统的密度算子  $\rho$

可通过其自旋极化矢量  $\mathbf{R}$  来表示<sup>[23]</sup>,即

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} + \mathbf{R} \times \boldsymbol{\tau}), \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为基本力学算子;  $\boldsymbol{\tau}$  为力学量算符。

量子系统的初始量子态为  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , 海洋气溶胶的量子态为  $|e\rangle$ , 经过退极化信道后可以演化为<sup>[24]</sup>

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow (|e_+\rangle\mathbf{I} + |e'_+\rangle\mathbf{X} + |e'_-\rangle\mathbf{Y} + |e_-\rangle\mathbf{Z}) \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle), \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{I}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$  为 4 个基本力学算子;  $|e_+\rangle, |e'_+\rangle, |e'_-\rangle, |e_-\rangle$  为 4 种特殊的海洋气溶胶环境量子态;  $\otimes$  为张量积, 用来表示复合系统的状态。  $|e_1\rangle$  为海洋气溶胶环境的初态;  $|e_x\rangle, |e_y\rangle, |e_z\rangle$  为 3 种以同等概率出现错误的海洋气溶胶环境量子态。令  $|e_+\rangle = |e_1\rangle, |e'_+\rangle = |e_x\rangle, |e'_-\rangle = |e_y\rangle, |e_-\rangle = |e_z\rangle$ , 则海洋气溶胶与量子态组成复合系统的么正变换可以表示为

$$|\varphi\rangle|e_1\rangle \rightarrow \sqrt{1-p}\mathbf{I}|\varphi\rangle \otimes |e_1\rangle + \sqrt{\frac{p}{3}}(\mathbf{X}|\varphi\rangle \otimes |e_x\rangle + \mathbf{Y}|\varphi\rangle \otimes |e_y\rangle + \mathbf{Z}|\varphi\rangle \otimes |e_z\rangle), \quad (9)$$

式中:  $|\varphi\rangle$  为一量子态;  $p$  为受海洋气溶胶影响在退极化信道中丢失一个光量子的概率。

对正交基  $\{|e_1\rangle\mathbf{I}, |e_x\rangle\mathbf{X}, |e_y\rangle\mathbf{Y}, |e_z\rangle\mathbf{Z}\}$  求偏迹, 可得到 4 个 Kraus 算子, 表达式为

$$\mathbf{K}_0 = \sqrt{1-p}\mathbf{I}, \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_1 = \sqrt{\frac{1}{3}p}\mathbf{X}, \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_2 = \sqrt{\frac{1}{3}p}\mathbf{Y}, \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_3 = \sqrt{\frac{1}{3}p}\mathbf{Z}, \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 。

$t$  时刻的密度算子可以表示为

$$\boldsymbol{\rho}(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \mathbf{I} + \left(1 - \frac{4}{3}p\right)\mathbf{R}(0) \right] \times \boldsymbol{\tau} \right\}, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{R}(0)$  为 0 时刻的自旋极化矢量。由(14)式可知, 自旋极化矢量以  $p' = \frac{4}{3}p$  的概率退极化, 其中

$$p = \frac{3}{4}(1 - 10^{-0.1L_{\text{att}} \cdot d}).$$

对于一个量子系统的密度矩阵, 经过退极化信道后可以演化为<sup>[25]</sup>

$$\begin{aligned} \varepsilon(\boldsymbol{\rho}) = \boldsymbol{\rho}' &= \left(1 - \frac{3}{4}p\right)\boldsymbol{\rho} + \frac{p}{4}(\mathbf{X} \times \\ &\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{X} + \mathbf{Y} \times \boldsymbol{\rho} \times \mathbf{Y} + \mathbf{Z} \times \boldsymbol{\rho} \times \mathbf{Z}). \end{aligned} \quad (15)$$

设量子系统  $\{p_i, \boldsymbol{\rho}_i\}, i=1, 2, 3, \dots$ , 说明量子系统以  $p_i$  的概率处于状态  $\boldsymbol{\rho}_i$ 。输入字符  $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|$  和  $\rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ , 经过退极化信道后, 密度算子可以演化为

$$\begin{aligned} \varepsilon\left(\sum_i p_i \boldsymbol{\rho}_i\right) &= \varepsilon[p_1 \boldsymbol{\rho}_1 + (1-p_1)\boldsymbol{\rho}_2] = \\ &p_1 \varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1) + (1-p_1)\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_2) = \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} p_1 + \frac{2}{3}p - \frac{4}{3}pp_1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{2}{3}p - p_1 + \frac{4}{3}pp_1 \end{bmatrix}。 \quad (16)$$

收到字符的冯·诺伊曼熵  $S[\varepsilon(\boldsymbol{\rho})]$  为

$$S[\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_1)] = S[\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_2)] = H\left(\frac{1}{2}p'\right) = H\left(\frac{2}{3}p\right), \quad (17)$$

式中:  $H(p)$  为二元熵函数,  $H(p) = -p \text{lb} p - (1-p) \text{lb}(1-p)$ 。

退极化信道的信道容量<sup>[26]</sup>为

$$\begin{aligned} C &= \max\left\{S[\varepsilon(p_i \boldsymbol{\rho}_i)] - \sum_i p_i S[\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_i)]\right\} = \\ &\max\left\{S[\varepsilon(p_i \boldsymbol{\rho}_i)] - H\left(\frac{1}{2}p'\right)\right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

当  $p'$  取 1/2 时,  $S[\varepsilon(\sum_i p_i \boldsymbol{\rho}_i)]$  的最大值为 1, 因此有信道容量为

$$C = 1 - H\left(\frac{1}{2}p'\right) = 1 - H\left(\frac{2}{3}p\right). \quad (19)$$

退极化信道的信道容量与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看到, 当海洋气溶胶粒子浓度一定时, 传输距离越大, 信道容量的减小幅度越大; 当传输距离不变时, 随着海洋气溶胶粒子浓度的增大, 粒子散射强度逐渐增大, 进而严重破坏量子相关性, 信道容量呈下降趋势。传输距离为 4 km, 当海洋气溶胶粒子浓度从 150/m<sup>3</sup> 增加到 400/m<sup>3</sup> 时, 信道容量从 0.817 bit/s 减小至 0.652 bit/s。传输距离为 8 km, 当海洋气溶胶粒子浓度从 300/m<sup>3</sup> 增加到 500/m<sup>3</sup> 时, 信道容量从 0.423 bit/s 减小至 0.349 bit/s。因此, 海洋气溶胶对信道容量有较大的影响, 可根据粒子浓度的高低来改变量子的脉冲强度和耦合强度等参数, 进

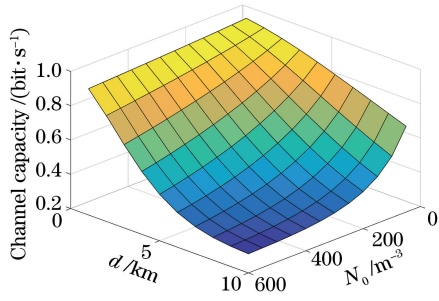


图 2 信道容量与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系

Fig. 2 Relationship between channel capacity and ocean aerosol particle concentration and transmission distance

而改善量子通信的传输性能。

#### 4 海洋气溶胶对量子信道保真度的影响

保真度是用来描述量子信号输出后的状态与初始状态的相似程度。光信号经过信道传输后的保真度<sup>[27]</sup>,可表示为

$$F = \text{Tr}(\rho^{0.5} \rho' \rho^{0.5})^{0.5}, \quad (20)$$

式中:  $\text{Tr}(\cdot)$  为矩阵的迹;  $\rho'$  为输入字符后密度算子的演化。其中

$$\rho = p_1 \rho_1 + (1 - p_1) \rho_2 = \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & 1 - p_1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\rho' = \begin{bmatrix} p_1 + \frac{2}{3}p - \frac{4}{3}pp_1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{2}{3}p - p_1 + \frac{4}{3}pp_1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

由(21)式和(22)式可以得到保真度,表达式为

$$F = \text{Tr}(\rho^{0.5} \rho' \rho^{0.5})^{0.5} = \text{Tr} \begin{bmatrix} \sqrt{p_1 \cdot \left( p_1 + \frac{2}{3}p - \frac{4}{3}pp_1 \right)} & 0 \\ 0 & \sqrt{(1 - p_1) \cdot \left( 1 - p_1 - \frac{2}{3}p + \frac{4}{3}pp_1 \right)} \end{bmatrix} = \sqrt{p_1 \cdot \left( p_1 + \frac{2}{3}p - \frac{4}{3}pp_1 \right)} + \sqrt{(1 - p_1) \cdot \left( 1 - p_1 - \frac{2}{3}p + \frac{4}{3}pp_1 \right)}. \quad (23)$$

对量子状态处于  $\rho_1$  的概率  $p_1$  值取 0.1, 信道保真度与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系如图 3 所示。从图 3 可以看到, 当传输距离保持不变时, 随着粒子浓度的增加, 信道保真度呈减小的趋势; 当粒子浓度一定时, 随着传输距离的增加, 信道保真度逐渐降低, 保真度的最小值达到 0.831。粒子浓度越大, 保真度随着传输距离的变化明显, 粒子浓度值为  $500/\text{m}^3$ , 当传输距离由 5 km 增加至 7 km 时, 保真度由 0.911 减小至 0.849。因此, 海洋气溶胶粒子浓度越高, 其消光作用越强, 量子信号输出后的状态越失真, 对保真度有一定的影响, 可根据粒子浓度的高低来调整信道的带宽或改变光信号的发射功率, 提高量子传输的准确率。

#### 5 海洋气溶胶对信道误码率的影响

当量子信号在大气中传输时, 受到海洋气溶胶的影响, 量子通信发生错误从而导致误码。量子误码率表示接收到的误码率与总误码率的比值, 表达式为

$$B_s = \frac{R_{\text{sea}}}{R_{\text{sift}}}, \quad (24)$$

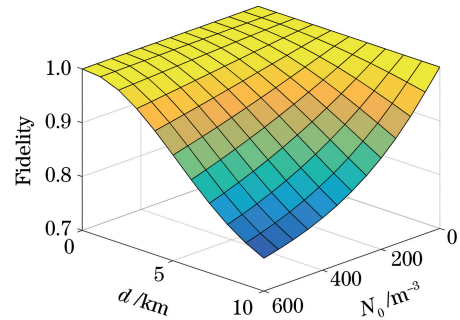


图 3 信道保真度与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系

Fig. 3 Relationship between channel fidelity and ocean aerosol particle concentration and transmission distance

式中:  $B_s$  为由海洋气溶胶引起的误码率;  $R_{\text{sea}}$  为接收到的误码率;  $R_{\text{sift}}$  为总误码率。

以 BB84 协议为参考, 则  $B_s$  可表示为<sup>[28]</sup>

$$B_s = \frac{\eta_{\text{det}} s (1 - \zeta) \exp(-4\eta_{\text{det}} s) + \zeta \eta_{\text{det}} s \exp(-\eta_{\text{det}} J)}{F_s R_r [1 - \exp(-\mu T_m P_{\text{acq}} T_{\text{app}} \eta_{\text{det}} F_{\text{mea}})]}, \quad (25)$$

式中： $\eta_{\text{det}}$  为单光子探测器量子的效率； $\zeta$  为海洋气溶胶所致的退极化效应因子， $\zeta = p'$ ； $s = s_{\text{bac}}/2 + n_p$ ， $s_{\text{bac}}$  为由背景噪声所致的光子计数， $s_p$  为单光子探测器的暗电流计数； $J = \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d) + 4s$ ； $F_s$  为筛选因子； $R_r$  为发射的脉冲重复率； $\mu$  为每脉冲的平均光子数； $T_m$  为退极化信道的传输因子， $T_m =$

$T_0^{\text{sec } \theta} = e^{-k_{\text{ext}} \cdot d \cdot \theta}$ ， $\theta$  为地面站到量子信息平台的天顶角， $T_0$  为退极化信道的信道传输率； $P_{\text{acq}}$  为单个光子捕获率； $T_{\text{app}}$  为系统装置的传输率； $F_{\text{mea}}$  为测量因子。

取  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ ，其他各参量的取值情况如表 3 所示。

表 3 各参量取值情况

Table 3 Values for each parameter

$\eta_{\text{det}}/\%$	$n_{\text{bac}}$	$n_p$	$F_s$	$R_r/\%$	$\mu$	$\theta/\text{rad}$	$P_{\text{acq}}/\%$	$T_{\text{app}}$	$F_{\text{mea}}$
65	$10^{-3}$	$10^{-6}$	0.5	50	1	20	50	1	1

信道误码率与雾天能见度和传输距离之间的关系如图 4 所示。从图 4 可以看到，当传输距离大于 5 km，粒子浓度大于  $300/\text{m}^3$  时，信道误码率开始有较明显的变化，且最大值达到 0.435；当传输距离不变时，随着粒子浓度的增加，误码率的值逐渐增大；当粒子浓度不变时，随着传输距离的增加，误码率呈上升趋势。传输距离为 8 km，当粒子浓度由  $300/\text{m}^3$  增加到  $500/\text{m}^3$  时，误码率由 0.027 增加到 0.092。传输距离为 9 km，当粒子浓度由  $500/\text{m}^3$  增加到  $550/\text{m}^3$  时，误码率由 0.135 增加到 0.192。因此，海洋气溶胶粒子浓度及传输距离对信道误码率有一定的影响。

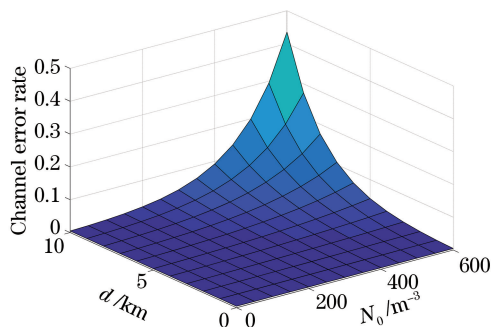


图 4 信道误码率与海洋气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系

Fig. 4 Relationship between channel error rate and ocean aerosol particle concentration and transmission distance

## 6 结 论

研究海洋气溶胶对自由空间量子通信性能的影响，根据海洋气溶胶的尺度谱分布，分析不同浓度的海洋气溶胶粒子的消光系数，并研究海洋气溶胶与量子通信链路衰减之间的关系。针对退极化信道，建立海洋气溶胶粒子浓度和传输距离与退极化信道信道容量、信道保真度和信道误码率之间的定量关系，并进行仿真模拟。仿真结果表明，随着海洋气溶

胶粒子浓度及传输距离的增大，链路衰减、信道容量、信道保真度及误码率都有不同程度的变化；链路衰减和误码率呈上升趋势，信道容量和信道保真度呈下降趋势。因此，在进行量子通信时，可对各项性能参数进行调整以提供理论参考，保证在该环境下的量子通信顺利进行。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Z L, Yang M W, Yu Q, et al. Security evaluation and risk assessment of quantum secrecy communication technology applied in radio and television industry [J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2018, 45(6): 44-47.  
吴钟乐, 杨木伟, 余庆, 等. 量子保密通信在广电领域应用的安全测评与风险评估 [J]. 广播与电视技术, 2018, 45(6): 44-47.
- [2] Lai J S, Wu B B, Tang R, et al. Analysis on the application and development of quantum communication [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(3): 123-129.  
赖俊森, 吴冰冰, 汤瑞, 等. 量子通信应用现状及发展分析 [J]. 电信科学, 2016, 32(3): 123-129.
- [3] Moehring D L, Maunz P, Olmschenk S, et al. Entanglement of single-atom quantum bits at a distance [J]. Nature, 2007, 449(7158): 68-71.
- [4] 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.
- [5] Kong C W. Research on the application of quantum communication technology in the field of finance [J]. Technology and Economic Guide, 2019, 27(10): 19-20.  
孔春伟. 量子通信技术在金融领域的应用研究 [J]. 科技经济导刊, 2019, 27(10): 19-20.
- [6] Wang J Y, Yang B, Liao S K, et al. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution [J]. Nature

- Photonics, 2013, 7(5): 387-393.
- [7] He Y F, Song C, Li D Q, et al. Asymmetric-channel quantum key distribution based on heralded single-photon sources [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0327001.  
何业锋, 宋畅, 李东琪, 等. 基于指示单光子源的非对称信道量子密钥分配 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0327001.
- [8] Luo J W, Li Y X, Meng W, et al. Quantum private communication system based on wavelength-mode division co-multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0927001.  
罗均文, 李云霞, 蒙文, 等. 基于波长-模式双复用的量子保密通信系统 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0927001.
- [9] Nie M, Chen W, Zhang M L, et al. Effects of haze on the free-space quantum state transfer [J]. Journal of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, 2015, 20(1): 19-23.  
聂敏, 陈伟, 张美玲, 等. 雾霾对自由空间量子态传输的影响 [J]. 西安邮电大学学报, 2015, 20(1): 19-23.
- [10] Nie M, Zhao X Y, Yang G, et al. Influence and performance analysis of snowstorm on the free space quantum communication channel [J]. Laser Journal, 2017(3): 5-10.  
聂敏, 赵新宇, 杨光, 等. 暴风雪对自由空间量子通信信道的影响及性能分析 [J]. 激光杂志, 2017(3): 5-10.
- [11] Nie M, Ren J, Yang G, et al. Influences of PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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.
- [12] Xu M C, Xu Q S. Effect of aerosol particle characteristic and vertical distribution on radiation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 0211002.  
徐梦春, 徐青山. 气溶胶粒子特性和垂直分布对辐射的影响 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0211002.
- [13] Yang L, Huang H Y, Li X, et al. Marine ecological environment monitoring in Germany and its enlightenment to China [J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(5): 796-800.  
杨璐, 黄海燕, 李潇, 等. 德国海洋生态环境监测现状及对我国的启示 [J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 796-800.
- [14] Wang F F. Analysis of the influence of typical marine meteorological parameters on the density spectrum of aerosol particles in the ocean atmosphere [D]. Hefei: Anhui University, 2019: 20-25.  
王菲菲. 典型海域气象参数对海洋大气气溶胶粒子数密度谱的影响分析 [D]. 合肥: 安徽大学, 2019: 20-25.
- [15] Sun Q Y, Xu J, Gao Y, et al. Transmission characteristics of visible light in different types of aerosols [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110103.  
孙琦云, 徐军, 高旻, 等. 可见光在不同类型气溶胶中的传输特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110103.
- [16] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric science: an introductory survey [M]. 2nd ed. Pittsburgh: Academic Press, 2006.
- [17] Bai W G, Zhang P, Zhang W J, et al. An efficient method for hyper-spectral infrared atmospheric radiation transfer calculation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(1): 99-108.  
白文广, 张鹏, 张文建, 等. 一种高效计算高光谱分辨率红外大气辐射传输的方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 99-108.
- [18] Johnson N D. Fundamentals of atmospheric radiation [J]. American Journal of Physics, 2007, 75(7): 671-672.
- [19] Lu X Y. Analysis of atmospheric aerosol parameter characteristics in typical areas and study of measurement methods [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 20-22.  
鲁先洋. 典型区域大气气溶胶参数特性分析及其测量方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 20-22.
- [20] Zhang H Y, Zhao W J, Ren D M, et al. Improved algorithm of mie scattering parameter based on MATLAB [J]. The Journal of Light Scattering, 2008, 20(2): 102-110.  
张合勇, 赵卫疆, 任德明, 等. 球形粒子 Mie 散射参数的 MATLAB 改进算法 [J]. 光散射学报, 2008, 20(2): 102-110.
- [21] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. 2nd ed. Netherland: Elsevier, 2002.
- [22] 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.
- [23] Pei C X. Quantum communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013: 118-119.  
裴昌幸. 量子通信: 研究生系列教材 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 118-119.
- [24] 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.
- [25] Fan H Y, Hu L Y. Entangled state representation theory of quantum decoherence in open systems[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 3-11.
- 范洪义, 胡利云. 开放系统量子退相干的纠缠态表象论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 3-11.
- [26] 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.
- [27] Lü H L. Effect of phase decoherence on fidelity of quantum transmission [D]. Chongqing: Southwest University, 2006: 48-52.
- 吕桓林. 相位退相干对量子传输保真度的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2006: 48-52.
- [28] Yan Y, Pei C X, Han B B, et al. Study of propagating on Earth-space paths in stratospheric quantum communication system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 834-837, 846.
- 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(5): 834-837, 846.