物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

不同海面风速对量子卫星星舰通信性能的影响

聂敏 张帆 杨光 张美玲 孙爱晶 裴昌幸

Effects of different sea surface wind speeds on performance of quantum satellite-to-ship communication

Nie Min Zhang Fan Yang Guang Zhang Mei-Ling Sun Ai-Jing Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 040303 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201091
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20201091
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

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

非均匀水流中涌浪运动对水下量子通信性能的影响
Influence of surge movement in non-uniform water flow on performance of underwater quantum communication
物理学报. 2018, 67(14): 140305 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180078

浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响
Effects of wind-generated bubbles layer on sound propagation underneath rough sea surface in shallow water
物理学报. 2020, 69(2): 024303 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191208

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

基于重复编码的海上可见光通信大气信道建模
Atmospheric channel model of maritime visible light communication based on repeated coding
物理学报. 2018, 67(21): 214206 https://doi.org/10.7498/aps.67.20181112

基于cluster态的信道容量可控的可控量子安全直接通信方案
Cluster state based controlled quantum secure direct communication protocol with controllable channel capacity
物理学报. 2017, 66(18): 180303 https://doi.org/10.7498/aps.66.180303

不同海面风速对量子卫星星舰通信性能的影响*

聂敏[1)] 张帆[1)†] 杨光[1)2)] 张美玲[1)] 孙爱晶[1)] 裴昌幸[3)]

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 7 月 9 日收到; 2020 年 10 月 10 日收到修改稿)

量子卫星星舰通信是量子保密通信的重要应用场景之一, 在海面上, 由于不同风速所引起的气溶胶粒子浓度发生剧烈变化, 而气溶胶粒子浓度的剧变, 必然导致星舰量子链路性能的剧烈衰减. 然而, 有关不同海面风速与量子卫星星舰通信信道参数关系的研究, 迄今尚未展开. 本文根据海面风速与气溶胶的 Gras 模型, 分别建立了风速与星舰量子信道误码率、信道容量和信道平均保真度的定量关系. 仿真结果表明, 当风速分别为 4 m/s 和 20 m/s 时, 海洋大气信道误码率、信道容量、信道平均保真度分别依次为 4.62×10^{-3} 和 4.91×10^{-3}、0.957 和 0.65、0.999 和 0.974. 由此可见, 风速对海上量子通信性能有显著的影响. 因此, 为了提高通信的可靠性, 应根据风速大小, 自适应调整系统的各项参数.

关键词: 气溶胶粒子浓度, 海上风速, 量子卫星通信, 退极化信道

PACS: 03.67.Hk, 92.20.Bk, 03.65.Yz, 03.67.–a **DOI:** 10.7498/aps.70.20201091

1 引 言

在远离大陆的海洋大气边界层中, 海洋型气溶胶一般包含两类: 海盐气溶胶和二次海洋气溶胶. 海盐气溶胶又称为海盐飞沫, 在大气中滞留时间短, 由海风在海面引起的海浪飞溅而产生[1]. 文献 [2] 定量分析了恒定方向风对波罗的海的气溶胶粒子数浓度的影响, 为海洋大气循环的研究提供了科学依据. 文献 [3] 分析了热带和亚热带太平洋海域中, 不同天气条件下的气溶胶粒子谱分布特征和新粒子的形成规律.

量子卫星星舰通信是量子保密通信的重要应用场景之一, 量子卫星星舰通信是构建全球性量子通信网络重要的组成部分. 2016 年, 由中国科学家自主研制的“墨子号”科学实验卫星在中国酒泉卫星发射中心成功发射, 这为未来覆盖全球的天地一体化量子通信网络建立了基础. 2020 年, 中国科学技术大学潘建伟院士团队[4], 在中国德令哈观测站和南山观测站, 实现了基于纠缠的千千米级安全量子加密, 证明了远距离量子加密通信的可行性, 推动了量子卫星网络的实用化进程. 同年, 新加坡国立大学量子技术中心联合代尔夫特理工大学[5], 提出了一种量子卫星星座模型, 能够以低延迟在任意两个地面站之间实现量子密钥分发, 为未来卫星量子网络的大规模应用奠定了基础. 近年来, 地面量子通信网络的研究也愈加完善. 文献 [6] 研究了基于隐形传态的量子保密通信方案. 文献 [7] 提出了基于纠缠的高效多用户量子加密网络.

量子卫星信号在进入接收端之前, 必然会受到多种因素影响. 文献 [8] 研究了 PM2.5 对自由空间量子通信性能的影响. 文献 [9] 分析了 K 分布强湍

* 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) 和陕西省教育厅科研计划项目 (批准号: 16JK1711) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 13310997259@163.com

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

流下自由空间测量设备观的量子密钥分发模型. 文献 [10] 研究了非均匀水流中涌浪运动对水下量子通信性能的影响. 文献 [11] 提出了一种基于软件定义量子通信的量子通信信道参数自适应调整策略, 使用该通信策略能够有效提高量子通信系统的生存性及综合免疫力.

本文针对退极化信道, 根据海面风速与气溶胶的Gras模型, 分析了不同海面风速对信道误码率、信道容量和保真度的影响, 建立它们之间的定量关系, 进行了仿真实验验证, 为海洋大气背景下自由空间量子通信提供了参照依据.

2 海风对海洋大气气溶胶粒子数谱分布的影响

图 1 是量子卫星星舰通信模型, 在图 1 中, S 是量子卫星, S_1, S_2, S_3 是船舰. 其中, 量子卫星是信号发送端, 接收端位于船舰上. 由于量子光信号的波长与气溶胶粒子尺寸相近, 当光信号在海洋大气中传输时, 会发生吸收、衰减等现象. 实际应用中, 海洋型气溶胶粒子数谱分布可以由对数正态分布来拟合 [12]

$$n(r)=\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}\lg r}=\frac{N_{\mathrm{o}}}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_{\mathrm{g}}}\exp\left[-\frac{(\lg r-\lg r_{\mathrm{g}})^2}{2\lg^2\sigma_{\mathrm{g}}}\right], \tag{1}$$

式中, N_{o} 为粒子数浓度, r_{g} 为粒子的几何标准半径, σ_{g} 为粒子的几何标准偏差, r 为粒子半径. 海洋气溶胶粒子谱分布按照粒子半径分为 3 个模态, 半径小于 0.8 μm 的细粒模、半径在 1 μm 左右的中间膜和半径在 2—3 μm 的粗粒模 [13]. 根据文献 [14,15], 中国南海的海洋气溶胶粒子谱分布由一个细粒模和一个中间膜叠加构成, 中国南海的海洋气溶胶粒子谱分布拟合如图 2 所示. 图 2 中, x 轴为粒子半径, y 轴为粒子谱分布. 其中, 细粒模、中间膜的拟合参数取值如表 1 所示.

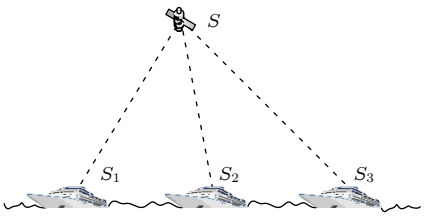

图 1 量子卫星星舰通信

Fig. 1. Quantum satellite-to-ship communication.

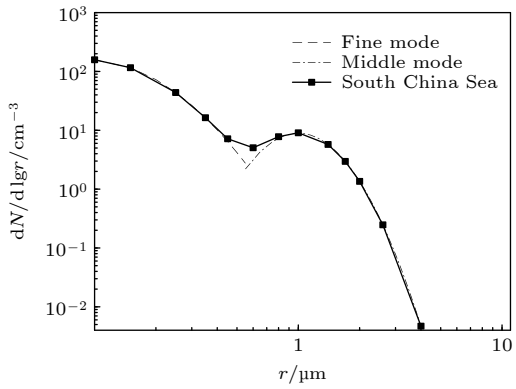

图 2 南海气溶胶粒子谱分布

Fig. 2. Size distribution of aerosol particle in the South China Sea.

表 1 南海气溶胶粒子谱分布各参量取值情况

Table 1. The value of each parameter of size distribution of aerosol particle in the South China Sea.

Mode	N_{o}	r_{g}/ μm	σ_{g}
Fine mode	254.93	0.09	0.53
Middle mode	7.96	1	0.7

海风引起的海浪飞溅会增加海洋大气边界层内的海盐气溶胶数目, 从而改变海洋大气气溶胶的粒子谱. 气溶胶粒子浓度和风速的Gras模型可以表示为 [16]

$$\lg N_{\mathrm{o}}=aU+b, \tag{2}$$

式中, U 为风速, a, b 为与粒子尺度相关的常数. 不同海面风速和海洋气溶胶粒子数密度谱分布的关系如图 3 所示. 图 3 中, x 轴为粒子半径, y 轴为粒子谱分布. 由图 3 可知, 风速会改变海洋大气气溶胶谱分布. 当粒径小于 0.3 μm 时, 风速对粒子数谱分布几乎不影响. 当粒径大于 0.3 μm、小于 4 μm

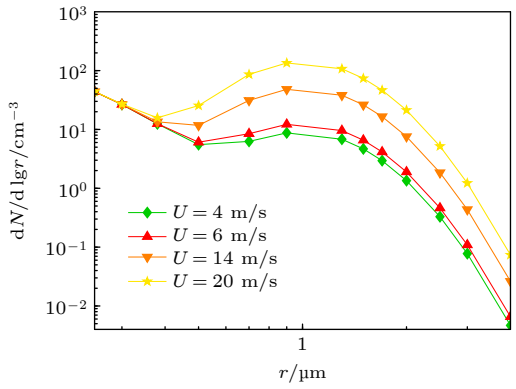

图 3 不同风速下的海洋气溶胶粒子谱分布

Fig. 3. Size distribution of marine aerosol particle under different wind speeds.

时, 粒子浓度随着风速增大明显上升. 由此可见, 海面风速变化会改变气溶胶粒子浓度, 从而影响气溶胶粒子谱分布.

3 风速对信道误码率的影响

光量子信号在海洋大气中传输时, 受到气溶胶的影响发生衰减, 最终产生误码. 量子信道误码率为接收到的误码比特率和总比特率之比, 可表示为

$$Q_{\mathrm{e}} = R_{\mathrm{m}}/R_{\mathrm{s}}, \tag{3}$$

式中, Q_{e}为海洋大气中气溶胶引起的误码率, R_{m}为气溶胶引起误码的比特率, R_{s}为总比特率, R_{s}可以表示为[17]

$$R_{\mathrm{s}} = F_{\mathrm{s}}R_{\mathrm{r}}\left[1-\exp\left(-\mu T_0 P_{\mathrm{a}} T_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{d}}F_{\mathrm{m}}\right)\right], \tag{4}$$

式中, F_{s}为筛选因子, R_{r}为发射机脉冲重复率, μ是激光脉冲平均光子数, P_{a}为单光子捕获概率, T_{a}为系统装置传输率, η_{d}为单光子探测器量子效率, F_{m}为测量因子, T_0为海洋大气信道传输率, 其值为

$$T_0 = 10^{-a_{\mathrm{e}}\cdot\lg\mathrm{e}\cdot\theta}, \tag{5}$$

式中, a_{e}为气溶胶的消光系数, θ为高斯光束发射天顶角. 根据 Mie 散射理论, 气溶胶消光系数a_{e}与消光效率因子、气溶胶粒子谱分布之间的关系可以表示为[18]

$$a_{\mathrm{e}} = \pi\int r^2 Q_{\mathrm{ext}}\left(r,\lambda,m\right)n\left(r\right)\mathrm{d}r, \tag{6}$$

式中, r为气溶胶粒子半径, $n\left(r\right)$为气溶胶粒子谱分布. Q_{ext}为气溶胶粒子消光效率因子, 可以表示为

$$Q_{\mathrm{ext}}\left(r,\lambda,m\right) = \frac{2}{x^2}\sum_{n=1}^{\infty}\left(2n+1\right)R_{\mathrm{e}}\left(a_n+b_n\right), \tag{7}$$

式中, λ为入射光波长, m为折射率, a_n, b_n, b_{n}为 Mie 系数. x为尺度参数, 可以表示为

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}, \tag{8}$$

R_{m}可以表示为[8]

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{m}} = {} & \eta_{\mathrm{d}}\left(n_1/2+n_2\right)\left(1-\gamma\right)\mathrm{e}^{-4\eta_d\left(n_1/2+n_2\right)} \\ & +\eta_{\mathrm{d}}\gamma\left(n_1/2+n_2\right)\mathrm{e}^{-\eta_{\mathrm{d}}M}, \end{aligned} \tag{9}$$

式中, n_1为背景噪声引起的光子计数, n_2为暗计数, γ为气溶胶退极化效率因子, $\gamma = 1-10^{-a_{\mathrm{e}}\cdot\lg\mathrm{e}}$, $M = e^{-a_{\mathrm{e}}L}+4\left(n_1/2+n_2\right)$, L为传输距离. 由 (4) 式、(9) 式可得:

$$Q_{\mathrm{e}} = \frac{\eta_{\mathrm{d}}\left(n_1/2+n_2\right)\left(1-\gamma\right)\mathrm{e}^{-4\eta_d\left(n_1/2+n_2\right)}+\eta_{\mathrm{d}}\gamma\left(n_1/2+n_2\right)\mathrm{e}^{-\eta_{\mathrm{d}}M}}{F_{\mathrm{s}}R_{\mathrm{r}}\left[1-\exp\left(-\mu T_0 P_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{d}}F_{\mathrm{m}}\right)\right]}. \tag{10}$$

采用波长λ等于 0.86 μm, 基膜高斯光束作为光源脉冲, 对于BB84协议, $F_{\mathrm{m}}=1$, $F_{\mathrm{s}}=1/2$, 对于B92协议, $F_{\mathrm{m}}=1/4$, $F_{\mathrm{s}}=1$. 本次数值仿真采用BB84协议, 在此工作波长下, 单光子探测器的量子效率可达 0.65, 这里忽略系统装置传输率, 即$T_{\mathrm{a}}=1$, 数值仿真各参量取值如表 2 所示.

信道误码率与海面风速、传输距离的关系如图 4 所示. 图 4 中, x轴为海面风速, y轴为传输距离, z轴为信道误码率. 由图 4 可知, 传输距离一定时, 随着海面风速增大, 信道误码率呈上升趋势. 传输距离小于 50 km, 海面风速不变, 随着距离增大, 误码率显著上升. 当传输距离为 100 km, 风速由 4 m/s 变为 20 m/s 时, 误码率由 4.62×10^{-3}增大到4.91×10^{-3}. 因此, 海面风速及传输距离对量子通信信道误码率有一定影响, 可根据风速大小调整光量子信号的发射功率, 改善量子通信的通信效果.

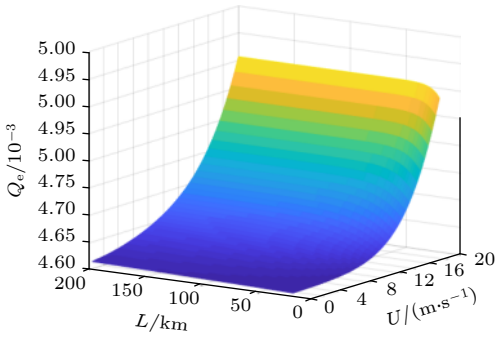

图 4 信道误码率与风速、传输距离的关系

Fig. 4. Relationship between channel bit error rate and wind speed、transmission distance.

表 2 信道误码率各参量取值情况

Table 2. The value of each parameter of channel bit error rate.

F_{s}	R_{r}	μ	P_{a}	T_{a}	η_{d}	F_{m}	n_1	n_2	θ
0.5	0.5	1	0.5	1	0.65	1	10^{-3}	10^{-6}	π/6

4 风速对信道容量的影响

一个量子态在海洋上方传输时, 会与大气环境发生相互作用, 导致消相干[19]. 对于退极化信道, 量子态的密度算子ρ可以通过自旋极化矢量$\boldsymbol{\Omega}$表示为

$$\boldsymbol{\rho}=\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Omega}\cdot\boldsymbol{\Psi}\right), \tag{11}$$

设初始量子态为$\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$, 与海洋大气环境联合演化可以表示为

$$\begin{aligned}&|e\rangle\left(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle\right)\rightarrow\left[|e_{+}\rangle\boldsymbol{I}+|e_{-}\rangle Z\right.\\&\left.+|e'_{+}\rangle\boldsymbol{X}+|e'_{-}\rangle\boldsymbol{Y}\right]\otimes\left(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle\right),\end{aligned} \tag{12}$$

令 $|e_{+}\rangle=|e_I\rangle$, $|e'_{+}\rangle=|e_X\rangle$, $|e'_{-}\rangle=|e_Y\rangle$, $|e_{-}\rangle=|e_Z\rangle$, 则量子态与海洋大气环境组成的复合系统幺正演化可以表示为

$$\begin{aligned}U:|\varphi\rangle|e_I\rangle\rightarrow&\sqrt{1-\gamma}\boldsymbol{I}|\varphi\rangle\otimes|e_I\rangle+\sqrt{\frac{\gamma}{3}}\left[\boldsymbol{X}|\varphi\rangle\otimes|e_X\rangle\right.\\&\left.+\boldsymbol{Y}|\varphi\rangle\otimes|e_Y\rangle+\boldsymbol{Z}|\varphi\rangle\otimes|e_Z\rangle\right],\end{aligned} \tag{13}$$

对正交基$\{|e_I\rangle,|e_X\rangle,|e_Y\rangle,|e_Z\rangle\}$求偏迹, 此时量子态的密度算子可以表示为[20]

$$\boldsymbol{\rho}'=\frac{1}{2}\left[\boldsymbol{I}+\left(1-\frac{4}{3}\gamma\right)\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{\Psi}\right], \tag{14}$$

由此可见, 量子态会以概率γ退极化, 自旋矢量的大小减小为原来的$1-\dfrac{4}{3}\gamma$. 海洋大气信道可以表示为

$$\varepsilon\left(\rho_i\right)=\lambda\frac{\boldsymbol{I}}{2}+\left(1-\lambda\right)\boldsymbol{\rho}_i. \tag{15}$$

信道容量 C可以表示为[21]

$$C=\max\left\{s\left[\varepsilon\left(\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i\right)\right]-\sum_i p_i s[\varepsilon(\boldsymbol{\rho}_i)]\right\}. \tag{16}$$

设发送端等概率发射字符 $\boldsymbol{\rho}_1=|0\rangle\langle 0|$, $\boldsymbol{\rho}_2=|1\rangle\langle 1|$, 则

$$\varepsilon\left(\sum_2\frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}_i\right)=\varepsilon\left[\frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}_1+\frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}_2\right]=\begin{bmatrix}\frac{1}{2}&0\\0&\frac{1}{2}\end{bmatrix}. \tag{17}$$

对应的诺依曼熵为

$$s\left[\varepsilon\left(\sum_2\frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}_i\right)\right]=H_2\left(\frac{1}{2}\right)=1, \tag{18}$$

式中, $H_2\left(\dfrac{1}{2}\right)$为二元香农熵. 接收字符的诺依曼熵为

$$\sum_i\frac{1}{2}s\left[\varepsilon\left(\boldsymbol{\rho}_i\right)\right]=H_2\left(\frac{\gamma}{2}\right), \tag{19}$$

结合 (18) 式、(19) 式, 海洋大气信道的信道容量可以表示为

$$C=1+\frac{\gamma}{2}\log_2\frac{\gamma}{2}+\left(1-\frac{\gamma}{2}\right)\log_2\left(1-\frac{\gamma}{2}\right), \tag{20}$$

退极化信道信道容量与风速的关系如图 5 所示. 图 5 中, x轴为海面风速, y轴为信道容量. 由图 5 可知, 随着风速增大, 信道容量呈减小趋势. 当风速由 4 m/s 增大为 20 m/s 时, 信道容量由 0.957 减大为 0.65. 因此, 海面风速对量子通信信道容量影响较大, 可根据风速调整信道带宽, 改善量子通信的通信效果.

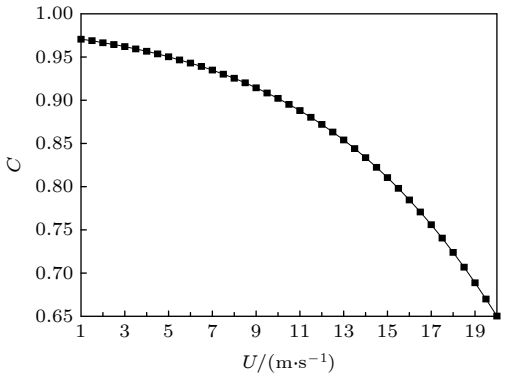

图 5 信道容量与风速的关系

Fig. 5. Relationship between channel capacity and wind speed.

5 风速对信道平均保真度的影响

量子态在海洋大气中传输时, 有一定的概率出现退极化. 信道的平均保真度 F可以表示为[22]

$$\begin{aligned}&F\left(\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i,\varepsilon\left(\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i\right)\right)\\&=\mathrm{tr}\left\{\sqrt{\sqrt{\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i}\varepsilon\left(\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i\right)\sqrt{\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i}}\right\},\end{aligned} \tag{21}$$

设输入字符为$\boldsymbol{\rho}_1=|0\rangle\langle 0|$、$\boldsymbol{\rho}_2=|1\rangle\langle 1|$, 则:

$$\begin{aligned}&\varepsilon\left(\sum_i p_i\boldsymbol{\rho}_i\right)\\&=\begin{bmatrix}\frac{\gamma}{2}+(1-\gamma)\,p_1&0\\0&\frac{\gamma}{2}+(1-\gamma)\,(1-p_1)\end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{22}$$

退极化信道的平均保真度可以表示为

$$F=\sqrt{\frac{\gamma+2(1-\gamma)p_1}{2}p_1}+\sqrt{\frac{\gamma+2(1-\gamma)(1-p_1)}{2}(1-p_1)}. \quad (23)$$

信道平均保真度与风速、信源概率的关系如图 6 所示. 图 6 中, x 轴为海面风速, y 轴为信源字符取$|0\rangle$的概率, z 轴为信道平均保真度. 由图 6 可知, 当信源取字符$|0\rangle$的概率一定时, 随着风速增加, 信道平均保真度呈减小趋势. p_1取 0—0.5 和 0.5—1 时, 信道平均保真度呈相互对称的形式. 当信源概率小于 0.1 或大于 0.9 时, 信道保真度随着风速增大急剧减小. 当信源概率取 0.001, 风速由 4 m/s 增大为 20 m/s 时, 保真度由 0.999 减小到 0.974. 因此, 风速对退极化信道平均保真度影响较小.

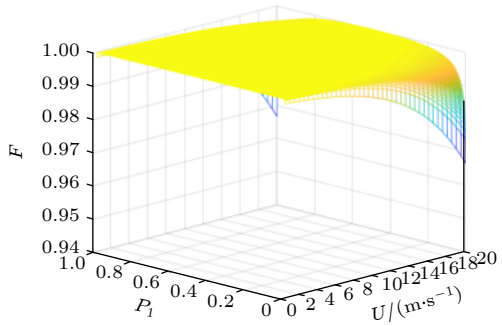

图 6 信道平均保真度与风速、信源概率的关系

Fig. 6. Relationship between channel average fidelity and wind speed、source probability.

6 结 论

本文研究了不同海面风速对海洋上方量子通信信道的影响. 根据风速和大气中气溶胶粒子数的对数关系, 拟合了不同风速下海洋大气气溶胶粒子谱分布曲线. 以BB84协议为例, 分析了风速及传输距离对信道误码率的影响. 针对退极化信道, 分析了风速对信道容量和信道平均保真度的影响. 仿真结果表明, 随着风速的增加, 量子通信的各项性能指标均受到不同程度的影响. 因此在海洋上方量子通信时, 需根据具体的海上天气指数, 调整通信系统参数, 以降低背景噪声对通信性能的影响.

参考文献

[1] Dai J N, Liu Y M, Wang P, Fu X, Xia M, Wang T 2020 *Atmos. Environ.* **236** 117604

[2] Plauškaitė K, Špirkauskaitė N, Byčenkienė S, Kecorius S, Jasinevičienė D, Petelski T, Zielinski T, Andriejauskienė J, Barisevičiūtė R, Garbaras A, Makuch P, Dudoitis V, Ulevicius V 2017 *Mar. Chem.* **190** 13

[3] Ueda S, Miura K, Kawata R, Furutani H, Uematsu M, Omori Y, Tanimoto H 2016 *Atmos. Environ.* **142** 324

[4] Yin J, Li Y H, Liao S K, Yang M, Cao Y, Zhang L, Ren J G, Cai W Q, Liu W Y, Li S L, Shu R, Huang Y M, Deng L, Li L, Zhang Q, Liu N L, Chen Y A, Lu C Y, Wang X B, Xu F H, Wang J Y, Peng C Z, Ekert A K, Pan J W 2020 *Nature* **582** 501

[5] Vergoossen T, Loarte S, Bedington R, Kuiper H, Ling A 2020 *Acta Astronaut.* **173** 164

[6] Yang L, Ma H Y, Zheng C, Ding X L, Gao J C, Long G L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 230303 (in Chinese) [杨璐, 马鸿洋, 郑超, 丁晓兰, 高建存, 龙桂鲁 2017 物理学报 **66** 230303]

[7] Xue P, Wang K K, Wang X P 2017 *Sci. Rep.* **7** 661

[8] Nie M, Ren J, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 150301 (in Chinese) [聂敏, 任杰, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2015 物理学报 **64** 150301]

[9] Gu W Y, Zhao S H, Dong C, Zhu Z D, Qu Y Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 090302 (in Chinese) [谷文苑, 赵尚弘, 东晨, 朱卓丹, 屈亚运 2019 物理学报 **68** 090302]

[10] Nie M, Pan Y, Yang G, Sun A J, Yu S Y, Zhang M L, Pei C Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 140305 (in Chinese) [聂敏, 潘越, 杨光, 孙爱晶, 禹赛雅, 张美玲, 裴昌幸 2018 物理学报 **67** 140305]

[11] Wei R Y, Nie M, Yang G, Zhang M L, Sun A J, Pei C X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 140302 (in Chinese) [卫容宇, 聂敏, 杨光, 张美玲, 孙爱晶, 裴昌幸 2019 物理学报 **68** 140302]

[12] Tian P F, Cao X J, Zhang L, Wang H B, Shi J S, Huang Z W, Zhou T, Liu H 2015 *Atmos. Environ.* **117** 212

[13] Dumka U C, Ningombam S S, Kaskaoutis D G, Madhavan B L, Song H J, Angchuk D, Jorphail S 2020 *Sci. Total Environ.* **734** 139354

[14] Lu X Y 2017 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [鲁先洋 2017 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

[15] Geng M 2017 *M.S. Thesis* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [耿蒙 2017 硕士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

[16] Wang F F, Li X B, Zheng X M, Zhang W Z, Luo T, Zhu W Y, Cheng W, Deng Z W 2019 *Infrared Laser Eng.* **48** 89 (in Chinese) [王菲菲, 李学彬, 郑显明, 张文忠, 罗涛, 朱文越, 成巍, 邓志武 2019 红外与激光工程 **48** 89]

[17] Zhang X Z, Xu Q, Liu B Y 2020 *Acta Optica Sin.* **40** 165 (in Chinese) [张秀再, 徐茜, 刘邦宇 2020 光学学报 **40** 165]

[18] Nie M, Chang L, Yang G, Zhang M L, Pei C X 2017 *Acta Phtonica Sin.* **46** 16 (in Chinese) [聂敏, 常乐, 杨光, 张美玲, 裴昌幸 2017 光子学报 **46** 16]

[19] Zhang D Y 2013 *Quantum Logic Gates and Quantum Decoherence* (Beijing: Science Press) pp90–110 (in Chinese) [张登玉 2013 量子逻辑门与量子退相干 (北京: 科学出版社) 第90—110页]

[20] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to Quantum Communication in Military* (Beijing: Military Science Press) pp224–228 (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224—228页]

[21] Yin H, Han Y 2013 *Quantum Communication Theory and Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp76–83 (in Chinese) [尹浩, 韩阳 2013 量子通信原理与技术(北京: 电子工业出版社) 第76—83页]

[22] Nielsen A, Chuang I (translated by Zheng D Z, Zhao Q C) 2005 Quantum Computation and Quantum Information (Vol.2) (Beijing: TsingHua University Press) pp57–60 (in Chinese) [尼尔森, 庄著(郑大钟, 赵千川译)2005 量子计算和量子信息(二) (北京: 清华大学出版社)第57—60页]

Effects of different sea surface wind speeds on performance of quantum satellite-to-ship communication*

Nie Min [1)] Zhang Fan [1)†] Yang Guang [1)2)] Zhang Mei-Ling [1)]
Sun Ai-Jing [1)] Pei Chang-Xing [3)]

1) (*School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, 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, Xidian University, Xi'an* 710071, *China*)

(Received 9 July 2020; revised manuscript received 10 October 2020)

Abstract

In the ocean atmosphere boundary layer far from the continent, marine aerosols generally include two types: sea salt aerosols and secondary marine aerosols. The sea salt aerosols, also called sea salt droplets, stay in the atmosphere for a short time. The sea salt aerosols are produced by the splashing of waves caused by sea breeze on the sea surface. Quantum satellite-to-ship communication is one of the important application scenarios of quantum secret communication. The quantum satellite-to-ship communication is an important part of building a global quantum communication network. In the South China Sea, because the change of wind speed will cause a sharp change in the concentration of aerosol particles and the sharp change of the concentration of aerosol particles can change its own extinction characteristics, the change of aerosol extinction characteristics will inevitably lead to a dramatic attenuation of the satellite-to-ship's quantum link performance. However, the research on the relationship between wind speed on the sea surface and quantum satellite satellite-to-ship communication channel parameters has not been carried out so far. In this paper, based on the Gras model of wind speeds on the sea surface and aerosol, the quantitative relationship between wind speed and satellite-to-ship quantum channel error rate, channel capacity and channel average fidelity are established respectively. The simulation results show that when the transmission distance is constant, as the sea surface wind speed increases, the channel bit error rate increases; as the wind speed increases, the channel capacity of quantum satellite satellite-to-ship communication decreases; when the source probability is constant, as the wind speed increases, the average fidelity of the channel shows a decreasing trend. When the wind speeds are 4 m/s and 20 m/s, the oceanic atmospheric channel error rate, channel capacity, and channel average fidelity are respectively 4.62×10^{-3} and 4.91×10^{-3}, 0.957 and 0.65, 0.999 and 0.974. It can be seen that the wind speed has a significant effect on the performance of maritime quantum communication. Therefore, when quantum communication over the ocean, in order to improve the reliability of communication, the parameters of the system should be adaptively adjusted according to the wind speed.

Keywords: aerosol particle concentration, wind speed at sea, quantum satellite communication, depolarizing channel

PACS: 03.67.Hk, 92.20.Bk, 03.65.Yz, 03.67.–a **DOI:** 10.7498/aps.70.20201091

* 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: 13310997259@163.com