

海冰对水下量子通信信道性能的影响

张秀再^{1,2*}, 翟梦思², 周丽娟², 葛羽洁²¹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;²南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 为研究海冰对水下量子通信信道性能的影响,基于海冰在不同的密度、盐度下的吸收与散射特性,建立了海冰参数与消光系数之间的关系、光量子信号衰减模型;根据海冰在不同密度、盐度下的消光特性,分别建立海冰参数与信道利用率、量子密钥分配系统误码率、系统成码率之间的关系并进行数据仿真。理论分析与仿真结果可为海冰环境下的水下量子通信设计提供参考。

关键词 海洋光学; 水下量子通信; 海冰; 链路衰减; 信道利用率; 系统误码率; 系统成码率

中图分类号 TN929.3; O431.2 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221521

1 引言

量子通信技术是量子信息学的一项重要分支,是利用量子叠加态和纠缠效应进行信息传递的高性能通信方式。量子通信以量子态为信息源实现所携带信息的有效传送,克服了传统密码技术的安全隐患,具有保密性能好、传输速度快、通信容量大等优点,可完成经典通信无法完成的任务,是通信史上继电话通信和光通信之后的又一次革命,是当前通信领域研究的热点。

目前,光纤量子通信技术和大气量子通信技术飞速发展,已逐渐趋于成熟,正大步迈向实用化阶段,与此同时,也有不少学者对水下量子通信展开研究,特别是水下量子密钥分配技术。2015年,中国海洋大学的顾永健团队^[1]利用蒙特卡罗方法和矢量辐射传递理论对水下量子通信信道进行仿真研究,结果表明背景噪声和信道衰减是影响水下密钥分发系统性能的重要因素,基于单光子的水下量子密钥分发是可行的。2017年,上海交通大学的金贤敏团队^[2]成功进行了海水量子通信实验,实验证明光量子比特在高损耗和散射的海水中仍可以建立稳定的安全密钥。2020年,Raouf等^[3]对水下湍流信道中BB84协议下量子密钥分发的性能进行了分析。同年,Tarantino等^[4]针对视距和非视距条件,对水下量子密钥分发系统的可行性展开研究探讨。

光量子信号在由发射端进入接收端之前,会不可避免地受到各种环境因素的影响。当量子通信在自由空间中进行时,大气中含量较高的气溶胶粒子、带电粒

子均会与光量子发生碰撞,导致光信号产生吸收和散射,从而致使通信质量下降;卷云、大雾等天气条件会降低大气能见度,产生消光效应,导致光量子能量发生衰减^[5-6]。海洋的组成结构极其复杂,故当量子通信在水下进行,海洋特有的自然现象、海水中各种有机物及悬浮物质会与光子发生相互作用,造成能量损耗。文献^[7]通过海面风速与大气气溶胶的分布模型,研究了不同海面风速对量子卫星星舰通信性能的影响;有关海水的盐度、涌浪运动、海洋湍流等对水下量子通信性能的研究也已经展开。

海冰是由海水冻结而成的咸水冰,由淡水冰晶、卤水泡和含有盐分的气泡等混合体组成。光量子信号在海冰中的传播、反射以及吸收受到凝结在海冰中的颗粒物和溶胶有机物的影响。文献^[8]研究了辽东湾区域海冰的叶绿素及海冰内的晶体粒径、盐度和温度的分布剖面,文献^[9]根据辽东湾海冰观测结果详细阐述了影响海冰反照率的因素,表明海冰的组成成分与反照率密切相关,为研究光量子信号在海冰环境下的传输提供了理论参考。

当光量子信号在水下传输时,海冰中的气泡、卤水泡及其他微生物颗粒等会对光信号产生吸收和散射,对光量子信号的传输造成严重干扰,导致通信性能降低。目前,关于海冰对水下量子通信信道性能影响的研究尚未展开。因此,根据海冰各组成成分的吸收和散射特性,分析海冰整体的消光特性,研究不同密度和盐度的海冰对链路衰减、信道利用率以及量子密钥分发系统的误码率和成码率的影响具有重要意义。

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-19; 录用日期: 2022-09-22; 网络首发日期: 2022-10-02

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)

通信作者: *zxzhering@163.com

2 海冰的消光特性分析

海冰的消光特性与其内部微观结构紧密相关。海洋环境下进行量子通信时,凝结在海冰中的颗粒物及溶解有机物会对光量子信号的传输产生影响,海冰中的气泡、卤水泡、固体盐晶等均对光量子信号产生消光效应。

通常情况下,海冰的总吸收系数 a_{si} 和总散射系数 b_{si} 主要由纯冰、卤水泡、气泡及以海藻为主的混合物决定^[10],其总的吸收系数表示为

$$a_{si} = a_i V_i + a_{br} V_{br} + a_{im} V_{im}, \quad (1)$$

式中: a_i 、 a_{br} 和 a_{im} 分别为纯冰、卤水泡及海冰中海藻的吸收系数,海藻颗粒在海冰中所占的体积分数非常小,故其对总吸收系数的影响可忽略不计,根据 Grenfell 和 Perovich^[11] 的研究,取 $a_i = 1.54 \times 10^{-9}$ 、 $a_{br} = 19.1 \exp[-0.02(\lambda - 400)]$, λ 为波长; V_i 、 V_{br} 和 V_{im} 分别为纯冰、卤水泡及海藻在海冰中所占的体积分数,满足

$$V_i = \frac{\rho_{si}}{\rho_i} - (W + 1) \frac{\rho_{br} V_{br}}{\rho_i}, \quad (2)$$

$$V_{br} = \frac{\rho_{si} s_i}{F_1(T)}, \quad (3)$$

$$V_a = 1 + \frac{F_2(T)}{F_1(T)} \rho_{si} s_i - \frac{\rho_{si}}{\rho_i}, \quad (4)$$

$$V_i + V_{br} + V_{im} + V_a = 1, \quad (5)$$

式中: ρ_{si} 为海冰密度,取值范围为 $800 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$; ρ_i 为海冰中纯冰的密度,单位为 kg/m^3 ,且 $\rho_i = 917 - T \times 1.403 \times 10^{-1}$, T 为海冰的温度; ρ_{br} 为卤水泡的密度,单位为 kg/m^3 ,且 $\rho_{br} = 1 + 0.0008 S_{br}$, S_{br} 为温度的函数; s_i 为海冰的盐度,取值范围为 $4\% \sim 13\%$; V_a 为空气泡的体积分数; W 、 $F_1(T)$ 和 $F_2(T)$ 均与温度相关,是温度的函数,当海冰温度 $T = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $S_{br} = 85.6\%$, $W = 0.261 \times 10^{-3}$, $F_1(T) = 91450.000$, $F_2(T) = 0.164$ 。

海冰由具有不同粒径分布的颗粒物组成,海冰总散射系数为海冰各组分散射之和,则海冰总散射系数^[12]可表示为

$$b_{si} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{sca, br} \pi r_{br}^2 N_{br}(r) dr + \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{sca, bub} \pi r_{bub}^2 N_{bub}(r) dr + \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{sca, im} \pi r_{im}^2 N_{im}(r) dr, \quad (6)$$

式中: $Q_{sca, br}$ 、 $Q_{sca, bub}$ 、 $Q_{sca, im}$ 分别为海冰中卤水泡、气泡和海藻颗粒物的散射效率因子,由于海冰中各组分的粒径均远大于可见光及近红外波长,故近似认为各组分的散射效率与组分种类无关,根据 Grenfell 等^[11] 的研究结果,令 $Q_{sca, br} = Q_{sca, bub} = Q_{sca, im} = 2$; r_{br} 、 r_{bub} 和 r_{im} 分别为卤水泡、气泡和海藻颗粒物的散射半径; r_{\min} 、

r_{\max} 为散射半径的最小值和最大值; $N_{br}(r)$ 、 $N_{bub}(r)$ 和 $N_{im}(r)$ 分别为卤水泡、气泡和海藻颗粒物的粒径分布函数,可表示为

$$N_{br}(r) = N_{bub}(r) = N_{im}(r) = N_a r^{-X}, \quad (7)$$

式中: r 为海冰各组分颗粒物的半径; X 为分布函数的指数,取值为 3.8; N_a 为与海冰密度、盐度相关的参量, $N_a = \frac{V_a}{6.7}$ 。

海冰的消光系数 k_{dsi} 由海冰的散射、吸收特性进行计算,可表示为

$$k_{dsi} = \frac{a_{si} + b'_{si}}{\varpi}, \quad (8)$$

式中: ϖ 为光场平均余弦值,取值为 0.656; b'_{si} 为海冰总后向散射系数,由海冰总散射系数 b_{si} 和散射相函数 $\tilde{\beta}(\psi)$ 确定^[13],可表示为

$$b'_{si} = 2\pi b_{si} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \tilde{\beta}(\psi) \sin \psi d\psi, \quad (9)$$

$$\tilde{\beta}(\psi) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \psi)^{\frac{3}{2}}}, \quad (10)$$

式中: ψ 为散射角; g 为与散射角相关的平均余弦值。

根据式(8),分别对海冰密度、海冰盐度与海冰消光系数的关系进行数值仿真。仿真结果如图 1、2 所示。

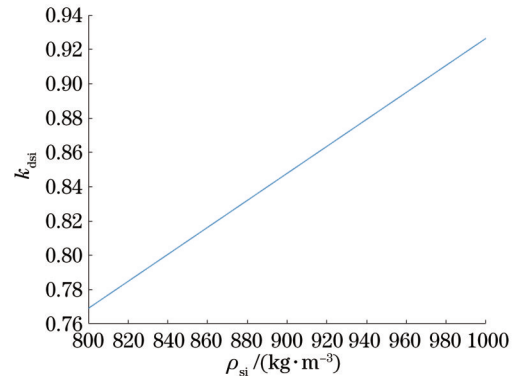


图 1 海冰密度与消光系数的关系

Fig. 1 Relationship between sea ice density and extinction coefficient

图 1 中,取波长 $\lambda = 450 \text{ nm}$,海冰盐度 $s_i = 10\%$ 。由图 1 可知,当海冰密度 ρ_{si} 逐渐增大时, k_{dsi} 呈增大趋势,即海冰光衰减系数增大。图 2 中,取波长 $\lambda = 450 \text{ nm}$,海冰密度 $\rho_{si} = 900 \text{ kg/m}^3$,当海冰盐度 s_i 增大,海冰的消光系数随即增大,且海冰盐度的变化对海冰消光系数的影响更明显。

3 海冰对水下量子通信链路衰减的影响

当光量子信号在水下传输时,由海冰导致的能量衰减为

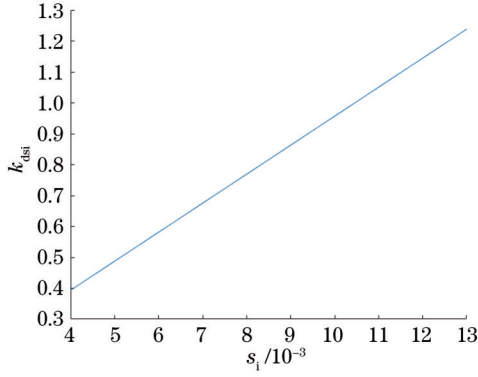


图2 海冰盐度与消光系数的关系

Fig. 2 Relationship between sea ice salinity and extinction coefficient

$$E = E_0 \exp(-k_{\text{dsi}} d), \quad (11)$$

式中: d 为传输距离; E_0 为量子信号的初始能量; E 为量子信号传输一定距离 d 后的能量。对式(11)取对数运算, 可得链路衰减因子 L_{att} 为

$$L_{\text{att}} = 10 \lg \left| \frac{E_0}{E} \right| = 10 k_{\text{dsi}} d \lg e. \quad (12)$$

类似于大气窗区^[14], 由纯海水的吸收光谱可知波长范围在 450~580 nm 间的蓝绿光在海水中的衰减较小。因此, 选取光信号的入射波长 $\lambda = 450$ nm。根据式(8)、(12), 分别对海冰密度与传输距离、海冰盐度与传输距离对链路衰减的影响进行数值仿真, 结果如图 3、4 所示。

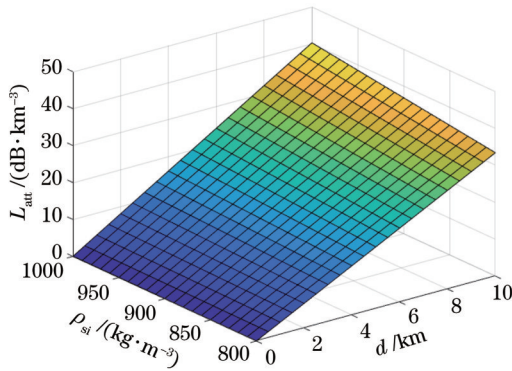


图3 海冰密度、传输距离与链路衰减的关系

Fig. 3 Relationship among sea ice density, transmission distance, and link attenuation

由图 3 可知, 当传输距离 $d = 10$ km、海冰密度由 810 kg/m^3 增加到 950 kg/m^3 时, 链路衰减由 33.74 增加到 38.52, 即保持传输距离不变, 链路衰减随海冰密度的增大而增大, 传输距离越远, 链路衰减值增大的趋势越明显。由图 4 可知, 当传输距离较短、海冰盐度较小时, 由海冰引起的链路衰减值也较小。随着量子信号传输距离和海冰盐度的增加, 链路衰减急速增大, 保持传输距离 $d = 10$ km 不变、海冰盐度由 5% 增加到 13% 时, 链路衰减由 21.16 增加到 53.78。由仿真结果

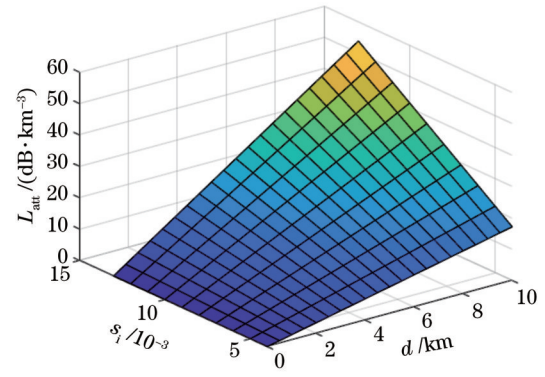


图4 海冰盐度、传输距离与链路衰减的关系

Fig. 4 Relationship among sea ice salinity, transmission distance, and link attenuation

可知, 相较海冰密度, 海冰盐度对光量子信号的影响更大。在设计海洋环境下的量子通信系统时, 需考虑海冰密度、海冰盐度对光量子态造成的影响, 特别是海冰盐度的影响。

4 海冰对水下量子通信信道利用率的影响

设地面卫星站发射端发送的量子比特为 R_a , 光量子信号经过海冰环境后接收端的量子比特变为 R_b , 则在海冰影响下的量子链路信息传输率 α 可表示为

$$\alpha = \frac{R_b}{R_a}. \quad (13)$$

设误码率为 r , 则一个光量子信息发送 n 次成功的概率为 $r^{n-1}(1-r)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。假设传输一帧信息需要 N 个传输周期, 对量子信令发送次数取均值, 则

$$N = \sum_{n=1}^{\infty} nr^{n-1}(1-r) = \frac{1}{1-r}. \quad (14)$$

当一个光量子完成有效信息传输时, 量子链路的平均利用率^[15]为

$$\gamma_s = \frac{t_c}{N(t_c + 2t_d + t_b)} = \frac{1-r}{1 + 2\frac{t_d}{t_c} + \frac{t_b}{t_c}}, \quad (15)$$

式中: t_c 为量子信令的传输时间; t_d 为量子信道传输时延; t_b 为反馈应答时延。

根据量子信道的物理特性, 结合海冰各物理参数, 定义在海冰环境下量子信道利用率为

$$\gamma = \alpha \frac{1-r}{1 + \frac{\rho_{\text{si}}'}{\rho_{\text{si}}} + \frac{s_i'}{s_i} + \frac{d'}{d}}, \quad (16)$$

式中: ρ_{si}' 为海冰密度的最大值; s_i' 为海冰盐度的最大值; d' 为传输距离的最大值。取量子链路信息传输率 $\alpha = 0.8$, $r = 0.01$, $s_i = 10\%$, $d' = 10$ km, 对海冰密度、传输距离与信道利用率之间的关系进行数值仿真, 结果如图 5 所示; 取 $\alpha = 0.8$, $r = 0.01$, $\rho_{\text{si}} = 900 \text{ kg/m}^3$, $d' = 10$ km, 对海冰盐度、传输距离与信道利用率之间的关

系进行仿真,结果如图 6 所示。

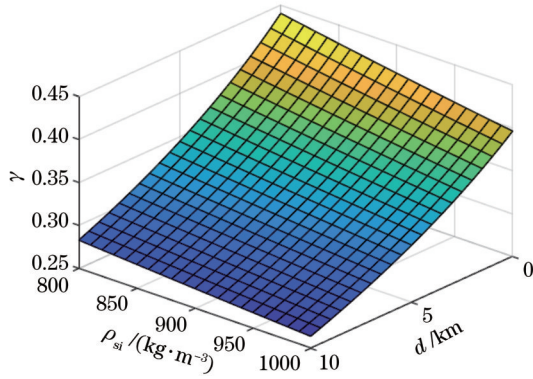


图 5 海冰密度、传输距离与信道利用率的关系

Fig. 5 Relationship among sea ice density, transmission distance, and channel utilization

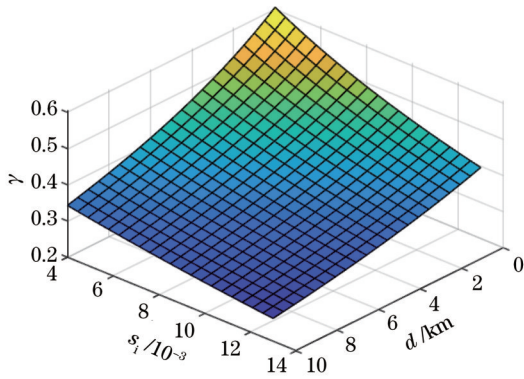


图 6 海冰盐度、传输距离与信道利用率的关系

Fig. 6 Relationship among sea ice salinity, transmission distance, and channel utilization

观察图 5 可知,保持传输距离 $d = 3$ km:当海冰密度由 850 kg/m^3 增加到 950 kg/m^3 时,信道利用率由 0.368 减小到 0.350;当海冰密度 $\rho_{si} = 860 \text{ kg/m}^3$,传输距离由 2 km 增加到 8 km 时,信道利用率由 0.380 减小到 0.290。由图 6 可知:保持传输距离 $d = 3$ km,海冰盐度由 5‰ 增加到 10‰ 时,信道利用率由 0.460 减小到 0.378;当海冰密度 $s_i = 8.5$ ‰、传输距离由 2 km 增加到 8 km 时,信道利用率由 0.430 减小到 0.320。由仿真结果可知,随着海冰密度与盐度的增加,光量子态受到的消光效应越来越明显,从而导致信道利用率降低。

5 海冰对水下量子通信信道误码率及成码率的影响

量子误码率和成码率是衡量量子密钥分配系统效率的重要指标^[16]。海洋环境下进行量子密钥分配时,光信号受到海冰各组分的吸收和散射作用,光子的数量减少,造成量子比特的偏振态发生变化,从而引起误码,降低密钥分配系统的成码率。

5.1 对系统误码率的影响

信道误码率的大小能够反映通信的安全性,是量子通信系统的一项重要参数。对于典型的 BB84 协议,误码率 Q_{EBR} 的计算公式为

$$Q_{\text{EBR}} = \frac{B_e}{B_s}, \quad (17)$$

式中: B_e 、 B_s 分别为量子比特检测错误的概率和每个脉冲的总检测概率^[17],可表示为

$$B_e = \frac{R_d(\lambda)A'\Delta t'\lambda\Delta\lambda\Omega}{4hc\Delta t} + I_{\text{dc}}, \quad (18)$$

$$B_s = N(d)\eta + \frac{R_d(\lambda)A'\Delta t'\lambda\Delta\lambda\Omega}{4hc\Delta t} + I_{\text{dc}}, \quad (19)$$

式中: h 为普朗克常量; Δt 为比特周期; $\Delta t'$ 为接收门时间; c 为真空光速; λ 为入射光波长, $\lambda = 450 \text{ nm}$; $\Delta\lambda$ 为滤波器的光谱宽度; A' 为接收器孔径面积; I_{dc} 为探测器暗流; η 为单光子探测器的量子效率,取典型值 30%; $\Omega = \pi(1 - \cos\theta_{\text{FOV}})$ 为探测器视角, θ_{FOV} 为视场角, $\theta_{\text{FOV}} = 10^\circ$; $R_d(\lambda)$ 为环境的辐照度; $N(d)$ 为光量子信号在传输距离 d 后剩余的(未被吸收或散射)光子数。 $R_d(\lambda)$ 和 $N(d)$ 可分别表示为

$$N(d) = N_0 \exp(-k_{\text{dsi}}d), \quad (20)$$

$$R_d(\lambda) = E_0(\lambda) \exp[-k(\lambda)z], \quad (21)$$

式中: N_0 为在初始时刻发射光量子的总数目; $E_0(\lambda)$ 为海平面上的辐照度^[18],取值为 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; z 为水下量子密钥分配深度, $z = 200 \text{ m}$; $k(\lambda)$ 为海水的平均漫衰减系数,取典型值 0.0184 m^{-1} 。

根据式(17),对海冰影响下的量子密钥分发系统误码率进行数值仿真。取海冰盐度 $s_i = 8$ ‰,对海冰密度、传输距离与水下量子系统误码率之间的关系进行仿真,结果如图 7 所示;取海冰密度 $\rho_{si} = 900 \text{ kg/m}^3$,对海冰盐度、传输距离与误码率之间的关系进行仿真,结果如图 8 所示。

图 7 中:系统误码率随传输距离和海冰密度 ρ_{si} 的增大而增大;当海冰密度大于 900 kg/m^3 时,误码率的增加幅度较大;海冰密度为 1000 kg/m^3 、传输距离为

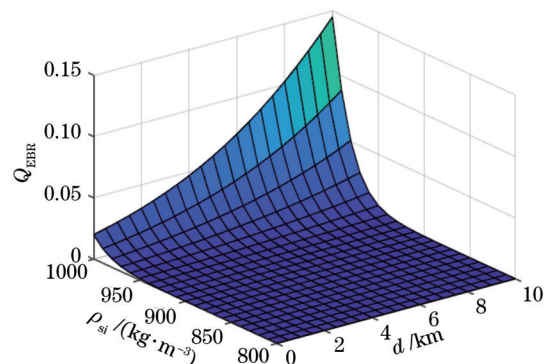


图 7 海冰密度、传输距离与系统误码率的关系

Fig. 7 Relationship among sea ice density, transmission distance, and system bit error rate

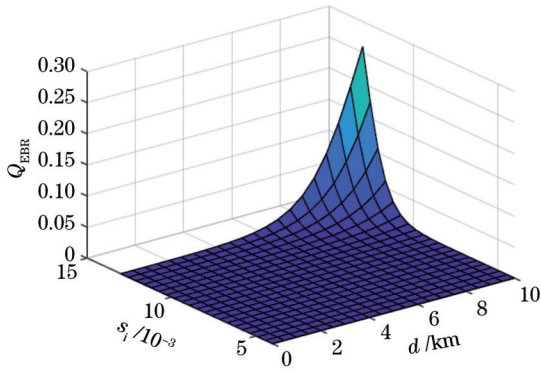


图8 海冰盐度、传输距离与系统误码率的关系

Fig. 8 Relationship among sea ice salinity, transmission distance, and system bit error rate

10 km 时,误码率达到最大值 0.1400。图 8 中,海冰对光的散射会造成组成量子比特的光子偏振发生改变,产生误码,故水下量子系统误码率随着不同海冰盐度的变化而发生改变,并且当海冰盐度较大时,传输距离对误码率的影响更明显,系统误码率的值急剧增加;在海冰盐度为 13‰、传输距离为 10 km 时,系统误码率达到最大值 0.2594。

一般误码率小于 0.1000 时,通信链路的安全性是可以保障的。因此,海洋环境水下量子通信时,需充分考虑海冰密度、海冰盐度与传输距离对误码率的影响。

5.2 对系统成码率的影响

在量子密钥分发系统中,信道误码率的大小限制量子密钥的成码率。在典型的 BB84 协议下,经过海水信道的衰减及通信双方基筛选后,量子密钥系统的成码率 $\kappa^{[19]}$ 可表示为

$$\kappa = \frac{1}{2} \nu \mu (1 - \chi)(1 - Q_{\text{EBR}}) \eta, \quad (22)$$

式中: ν 为激光器的光脉冲频率; χ 为水下量子信道的衰减率; μ 为单个脉冲的平均光子数。取水下量子通信的参数典型值时,激光器的光脉冲频率为 40 MHz,每个脉冲的平均光子数目为 0.1。基于此条件,对海冰影响下的水下量子密钥分发系统的成码率进行仿真。

取海冰盐度 $s_i = 8\%$,对海冰密度、传输距离与系统成码率之间的关系进行数值仿真,结果如图 9 所示;取海冰密度 $\rho_{si} = 900 \text{ kg/m}^3$,对海冰盐度、传输距离与成码率之间的关系进行数值仿真,结果如图 10 所示。

由图 9 可知:当海冰密度为 950 kg/m^3 、传输距离由 1 km 增加到 10 km 时,海冰各组分与光子发生的相互作用造成光能量的损耗,导致量子密钥分发系统成码率由 0.5558 减小到 0.4875;当传输距离一定时,随着海冰密度逐渐变大,系统成码率逐渐降低。由图 10 可知:密钥分发系统的成码率受海冰盐度与传输距离

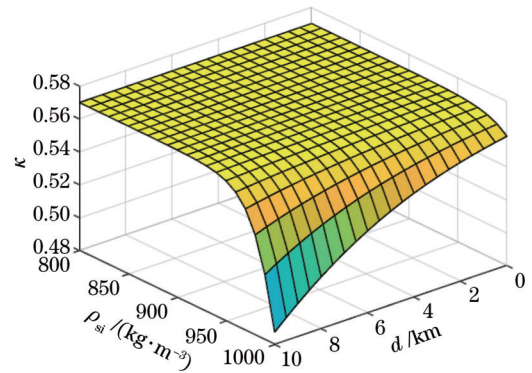


图9 海冰密度、传输距离与系统成码率的关系

Fig. 9 Relationship among sea ice density, transmission distance, and system bit rate

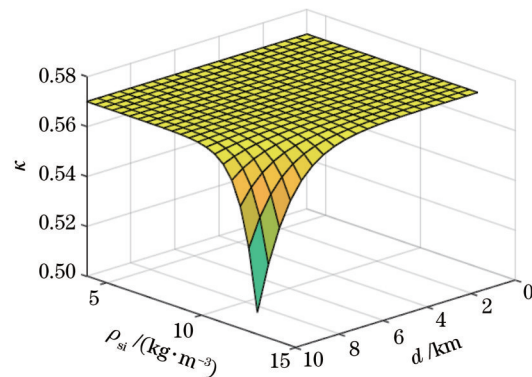


图10 海冰盐度、传输距离与系统成码率的关系

Fig. 10 Relationship among sea ice salinity, transmission distance, and system bit rate

的影响,在海冰盐度较小、传输距离较短时,系统成码率变化缓慢;当海冰盐度大于 10‰、传输距离大于 7 km 时,光量子信号的衰减较为严重,导致成码率的值快速下降。

光量子信号在海冰环境下传输时,会导致误码率升高和成码率降低。因此,在进行水下量子密钥分配时,为提高成码率、降低误码率,行之有效的方法是增加激光脉冲的发射频率、减少背景噪声,完善系统以及光学元件的性能,例如使用空间、频谱和时域上的滤波技术来减少背景光等。

6 结 论

根据海冰的消光特性,建立了海冰密度、海冰盐度与链路衰减、信道利用率、量子密钥分发系统误码率和系统成码率之间的关系,对比分析了海冰在不同参数下对水下量子通信性能的影响。仿真结果表明,随着传输距离及海冰盐度或海冰密度的增加,链路衰减及水下量子密钥分发系统成码率均呈现减小的趋势,量子通信信道利用率和系统成码率均有不同程度的下降。相比较而言,海冰盐度的变化对通信质量造成的干扰更大,对各项信道参数的影响更明显。

参 考 文 献

- [1] Shi P, Zhao S C, Gu Y J, et al. Channel analysis for single photon underwater free space quantum key distribution[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(3): 349-356.
- [2] Ji L, Gao J, Yang A L, et al. Towards quantum communications in free-space seawater[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19795-19806.
- [3] Raouf A H F, Safari M, Uysal M. Performance analysis of quantum key distribution in underwater turbulence channels[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(2): 564-573.
- [4] Tarantino S, Lio B D, Cozzolino D, et al. Feasibility study of quantum communications in aquatic scenarios[J]. Optik, 2020, 216: 164639.
- [5] 张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 卷云对自由空间星地量子通信信道的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2027001.
Zhang X Z, Xu X, Liu B Y. Influence of cirrus clouds on space-to-earth quantum communication channels in free space[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2027001.
- [6] 张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 雾对自由空间量子通信性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0727001.
Zhang X Z, Xu X, Liu B Y. Influence of fog on performance of free-space quantum communication[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0727001.
- [7] 聂敏, 张帆, 杨光, 等. 不同海面风速对量子卫星星舰通信性能的影响[J]. 物理学报, 2021, 70(4): 040303.
Nie M, Zhang F, Yang G, et al. Effects of different sea surface wind speeds on performance of quantum satellite-to-ship communication[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 040303.
- [8] 李志军, 丁德文, 闫启仑, 等. 辽东湾海冰晶体结构及其内部叶绿素的初步研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 21-28.
Li Z J, Ding D W, Yan Q L, et al. Preliminary study on the sea ice crystals and chlorophyll in Liaodong Bay[J]. Marine Environmental Science, 1997, 16(3): 21-28.
- [9] 许占堂, 杨跃忠, 王桂芬, 等. 辽东湾海冰反射特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1902-1907.
Xu Z T, Yang Y Z, Wang G F, et al. Reflectance of sea ice in Liaodong Bay[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(7): 1902-1907.
- [10] Grenfell T C. A radiative transfer model for sea ice with vertical structure variations[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C9): 16991-17001.
- [11] Grenfell T C, Perovich D K. Radiation absorption coefficients of polycrystalline ice from 400-1400 nm[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(C8): 7447-7450.
- [12] 许大志, 曹文熙, 孙兆华. 辽东湾海冰光衰减特性[J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 12-19.
Xu D Z, Cao W X, Sun Z H. Light attenuation properties of the sea ice in the Liaodong Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(1): 12-19.
- [13] Mobley C D, Cota G F, Grenfell T C, et al. Modeling light propagation in sea ice[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1743-1749.
- [14] 孙源隆, 石广玉. 利用可见光与近红外大气窗区的组合通道探测陆面上空气溶胶[J]. 大气科学, 2011, 35(2): 350-360.
Sun Y L, Shi G Y. Detecting aerosols over land using combined channels within the visible and near IR atmospheric windows[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(2): 350-360.
- [15] 李建东, 盛敏, 李红艳. 通信网络基础[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 94-101.
Li J D, Sheng M, Li H Y. Network foundation[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 94-101.
- [16] Scarani V, Bechmann-Pasquinucci H, Cerf N J, et al. The security of practical quantum key distribution[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(3): 1301-1350.
- [17] Lanzagorta M. Underwater communications[M]. San Rafael: Morgan & Claypool, 2013.
- [18] 张秀再, 刘邦宇, 徐茜. 海洋矿物质颗粒对水下量子通信信道性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1927001.
Zhang X Z, Liu B Y, Xu X. Influence of marine mineral particles on channel performance of underwater quantum communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1927001.
- [19] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 145-195.

Effect of Sea Ice on Performance of Underwater Quantum Communication Channels

Zhang Xiuzai^{1,2*}, Zhai Mengsi², Zhou Lijuan², Ge Yujie²

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

²School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract

Objective Quantum communication uses the quantum state as an information source to achieve the effective transmission of the information of quantum state carries. It has the advantages of high security, high transmission speed, and large communication capacity and is thus a hotspot in the current communication field. However, when an equivalent optical signal is transmitted underwater, it is inevitably affected by environmental factors, resulting in the degradation of transmission performance. Sea ice is one of the important factors that affect the transmission of optical quantum signals underwater. It is composed of freshwater ice crystals, brine bubbles, and bubbles containing salt. When an optical quantum signal is transmitted underwater, the bubbles, brine bubbles, and other microbial particles in sea ice absorb and

scatter the optical signal, seriously interfering with the transmission of the signal and resulting in reduced communication performance. The propagation, reflection, and absorption of optical quantum signals in sea ice are affected by the particles and sol organics condensed in the sea ice. However, the influence of sea ice on the performance of underwater quantum communication channels has rarely been reported. Therefore, it is of great significance to analyze the extinction characteristics of sea ice as a whole according to the absorption and scattering characteristics of each component of sea ice and study the influence of sea ice with different density and salinity on link attenuation, channel utilization, and the bit error rate and bit rate of a quantum key distribution system.

Methods Sea ice is composed of bubbles, brine bubbles, and other particles. To study the influence of sea ice on the performance of underwater quantum communication channels, this paper analyzes the absorption and scattering characteristics of each component of sea ice. Subsequently, on the basis of the absorption and scattering characteristics of sea ice with different density and salinity, it explores and simulates the relationships of sea ice parameters with the extinction coefficient. Then, according to the extinction characteristics of sea ice with different density and salinity, a constant incident wavelength is adopted, and the relationships of sea ice parameters with link attenuation and channel utilization are determined and simulated experimentally. Finally, the paper examines the effects of sea ice with different density and salinity on the bit error rate and bit rate of a quantum key distribution system and implements data simulation. The theoretical analysis and simulation results can provide a reference for the design of underwater quantum communication in sea ice environments.

Results and Discussions Under the same incident wavelength, the extinction coefficient of sea ice increases with sea ice density and sea ice salinity, and it is more markedly affected by the change in sea ice salinity (Fig. 2). When the transmission distance is short and sea ice salinity is small, the link attenuation caused by sea ice is also small. As the transmission distance of the optical quantum signal and sea ice salinity increase, link attenuation increases rapidly (Fig. 4). As sea ice density rises, the extinction effect on the quantum state of the light becomes more obvious, which leads to a decrease in channel utilization (Fig. 5). Since the scattering of light by sea ice changes the polarization of photons constituting the qubit and causes bit errors, the bit error rate of the underwater quantum system increases with sea ice salinity (Fig. 8). The bit rate of the key distribution system is affected by sea ice salinity and transmission distance. When sea ice salinity is small and transmission distance is short, the system bit rate changes slowly. When sea ice salinity is large and transmission distance is long, the attenuation of the optical quantum signal is serious, and the value of the bit rate decreases rapidly (Fig. 10).

Conclusions According to the extinction characteristics of sea ice, this paper determines the relationships of sea ice density and sea ice salinity with link attenuation, channel utilization, and the bit error rate and bit rate of the quantum key distribution system. Furthermore, it comparatively analyzes the influence of sea ice on the performance of underwater quantum communication under different parameters. The simulation results show that the link attenuation and the bit rate of the underwater quantum key distribution system tend to decrease as transmission distance and sea ice salinity or sea ice density increase. Moreover, the utilization rate of the quantum communication channel and the system bit rate decrease to varying degrees. In comparison, the change in sea ice salinity interferes more strongly with communication quality and influences the channel parameters more saliently. Therefore, the effects of sea ice density and sea ice salinity on the quantum state of light, especially the effects of sea ice salinity, must be fully considered when underwater quantum communication is conducted.

Key words oceanic optics; underwater quantum communication; sea ice; link attenuation; channel utilization; bit error rate of system; system bit rate