

海洋矿物质颗粒对水下量子通信信道性能的影响

张秀再^{1,2*}, 刘邦宇¹, 徐茜¹¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;²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

摘要 海洋矿物质颗粒是影响光子在水下传输的重要因素之一。为了研究海洋矿物质颗粒对水下量子通信信道性能的影响,建立了海洋矿物质颗粒群密度、传输距离与链路衰减的关系模型并进行了仿真。针对退极化信道,研究了矿物质颗粒群密度和传输距离与信道容量、信道误码率的关系并进行了仿真。仿真结果表明,当传输距离为 50 m 时,随着矿物质颗粒群密度的增大,链路衰减由 0.098 dB 增加到 2.92 dB,链路效率由 6.2×10^{-6} 减小到 2.7×10^{-7} 。当矿物质颗粒群密度为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 时,随着传输距离的增加,信道容量由 0.97 逐渐减小到 0.6,误码率呈指数增大。由此可见,消光效应造成的影响在传输过程中不可忽略,在实际通信过程中,应根据环境情况及时调整传输设备的参数,保证通信质量。

关键词 量子光学; 水下量子通信; 矿物质颗粒; 退极化信道; 链路衰减; 信道容量; 信道误码率

中图分类号 TN929.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1927001

Influence of Marine Mineral Particles on Channel Performance of Underwater Quantum Communication

Zhang Xiuzai^{1,2*}, Liu Bangyu¹, Xu Xi¹

¹School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

²Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Marine mineral particles are one of the important factors influencing underwater photon transmission. In order to study the influence of marine mineral particles on the channel performance of underwater quantum communication, the relationship model among marine mineral particle group density, transmission distance and link attenuation is established and the simulation is conducted. In addition, as for depolarization channels, the relationship among mineral particle density, transmission distance, channel capacity and channel bit error rate is established and the simulation is conducted. The simulation results show that when the transmission distance is 50 m, the link attenuation increases from 0.098 dB to 2.92 dB and the link efficiency decreases from 6.2×10^{-6} to 2.7×10^{-7} with the increase of mineral particle group density. When the mineral particle group density is $1.0 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$, the channel capacity decreases gradually from 0.97 to 0.6 with the increase of transmission distance, but the bit error rate increases exponentially. Thus it can be drawn that the influence caused by the extinction effect cannot be ignored in the transmission process. In the practical communication process, the parameters of the transmission equipment should be adjusted in time according to the environmental conditions in order to ensure the communication quality.

Key words quantum optics; underwater quantum communication; mineral particles; depolarization channel; link attenuation; channel capacity; channel bit error rate

OCIS codes 270.5565; 290.4210; 010.4030

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-04-19

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

通信作者: *zxzhering@163.com

1 引言

量子通信技术利用量子纠缠效应和叠加态,通过经典通信信道,实现量子态密钥的传输,在理论上保证了量子信息不可监听的绝对安全性。在水下进行信息传输是一项具有挑战性的任务,量子密钥分发是一种能够在自由空间、光纤和空间链路等多种环境下保证安全通信的方案。然而,大量密钥分发的实验仅限于光纤和自由空间,只有少数研究集中在水下,所以水下量子通信仍是一个相对较新的研究领域。

2012 年, Lanzagorta^[1]详细讨论了水下光通信设备的系统设计、组成和噪声分析,在不同类型的海洋水域模拟了通信系统的性能,验证了利用量子密钥分配协议和量子信道构建水下通信的可行性。2017 年,上海交通大学金贤敏课题组开展了海水量子通信实验,发现光子极化量子态和量子纠缠可以在高损耗和高散射的海水中保持量子特性,首次实验验证了水下量子通信的可行性^[2]。2021 年, Mastriani 等^[3]研究了水下量子通信的双向隐形传态,评估了一个双向隐形传态协议在六个或更多量子位的 IBM Q Experience 量子处理器上的性能,结果证明,即使是少门量子电路,也存在很高的退相干性和对翻转误差的敏感性。2020 年,何业锋等^[4]对基于标记配对相干态的测量设备无关量子密钥分配协议进行了统计涨落分析,结果表明,通过增加脉冲数,能增大密钥生成率和最大传输距离,降低误码率,且基于标记配对相干态的协议性能比基于指示单光子源的协议性能好,研究结果为量子密钥分配协议性能的改善提供了理论基础。2020 年,张秀再等^[5]根据海洋气溶胶粒子的尺度谱分布以及消光系数,对该环境下量子通信信道的性能参数进行了仿真分析,研究结果为实际量子通信时参数的自适应调整提供了参考。

在水下进行量子信号传输时,水中复杂多变的环境会对光信号造成不同程度的影响。文献[6]研究了水下湍流对传输误码率的影响,并在水下量子信道中比较了不同的量子密码协议,验证了高维编码方案的可行性。文献[7]研究了星潜链路上连续变量量子密钥分配的信道参数估计问题,模拟评估了估计参数对循环量子密钥分发(QKD)系统性能的影响,研究结果为实现水下通信的全球网络提供了一种无条件安全的方法。

在沿海海洋环境中,河流排放、波浪和海流的作

用造成部分海岸侵蚀,海底悬浮物增多,其中矿物质颗粒通常占很大比例。研究表明,悬浮矿物质颗粒对海洋光学特性有重要的影响,包括光谱反射率(海洋颜色)。这种颗粒在海水中含量丰富,由于其相对于水的高折射率,海洋矿物质颗粒对光有强烈的散射^[8],并且对光的吸收通常是不可忽略的。当进行水下量子通信时,量子光信号会不可避免地受到水下环境因素的影响,导致信道性能降低。目前关于海洋矿物质颗粒对水下量子通信性能的影响研究鲜有报道。因此,研究矿物质颗粒对量子通信信道性能的影响有重要意义。

本文首先对海洋矿物质颗粒的消光特性进行了分析,然后结合传输距离和颗粒群密度,分别对链路衰减、链路效率、退极化信道容量以及信道误码率展开了研究,建立了相关模型并进行了数值仿真。

2 海洋矿物质颗粒的消光特性

海洋矿物质颗粒在海水中通常以单一物质颗粒群的形式存在,具有多粒径和多分散性。为了更好地理论模拟矿物质颗粒群的消光特性,利用 Mie 模型^[9]对矿物质颗粒的光学特性进行了模拟计算。单位质量的散射系数 b_m^* 和吸收系数 a_m^* 可分别表示为

$$b_m^* = \frac{3}{2c} \frac{\int_{D_{r_{\min}}}^{D_{r_{\max}}} Q_b(\lambda) \cdot D_r^2 \cdot N(D_r) dD_r}{\int_{D_{r_{\min}}}^{D_{r_{\max}}} D_r^3 \cdot N(D_r) dD_r}, \quad (1)$$

$$a_m^* = \frac{3}{2c} \frac{\int_{D_{r_{\min}}}^{D_{r_{\max}}} Q_a(\lambda) \cdot D_r^2 \cdot N(D_r) dD_r}{\int_{D_{r_{\min}}}^{D_{r_{\max}}} D_r^3 \cdot N(D_r) dD_r}, \quad (2)$$

式中: $D_{r_{\max}}$ 为海洋矿物质颗粒的最大粒径; $D_{r_{\min}}$ 为海洋矿物质颗粒的最小粒径; Q_b 为散射效率因子; λ 为入射光波长; Q_a 为吸收效率因子; c 为矿物质颗粒群的质量密度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); D_r 为矿物质颗粒群的等效粒径; $N(D_r) dD_r$ 为单位体积的水体内粒径在 $D_r \sim D_r + dD_r$ 范围内的颗粒数; $N(D_r)$ 为海洋矿物质颗粒的粒径分布模型,可表示为

$$N(D_r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \cdot D_r \cdot \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln D_r - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \quad (3)$$

式中: N 为矿物质颗粒群密度 (m^{-3}); D_g 为平均粒径,取 $0.5 \mu\text{m}$; σ_g 为标准差。

散射效率 $Q_b(\lambda)$ 和吸收效率 $Q_a(\lambda)$ ^[10] 可分别

表示为

$$Q_b = \frac{2}{x^2} \sum_{N=1}^{\infty} (2N+1)(|a_N|^2 + |b_N|^2), \quad (4)$$

$$Q_c = \frac{2}{x^2} \sum_{N=1}^{\infty} (2N+1)\text{Re}(a_N + b_N), \quad (5)$$

$$Q_a = Q_c - Q_b, \quad (6)$$

式中： Q_c 为消光效率； $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部运算； a_N 和 b_N 为 Mie 系数，是粒径参数 x 和单个海洋矿物质颗粒的复折射率 m^* 的函数，其中 $x = \pi D_r / \lambda$ ， $m^* = n - in'$ ， n 为实部， n' 为虚部。矿物质颗粒群的等效复折射率 $n'(\lambda)$ 采用文献[11]中的指数衰减模型，可表示为

$$n'(\lambda) = 0.007954 \exp(-0.0078186\lambda). \quad (7)$$

矿物质颗粒群的总衰减系数 c_m^* 表示为

$$c_m^* = a_m^* + b_m^*. \quad (8)$$

3 海洋矿物质颗粒对水下量子通信链路衰减的影响

在水下进行光量子信号传输时，海水中的细矿物质颗粒群与光子之间相互碰撞，导致光子能量衰减，传输效率降低。碰撞导致的光量子态能量衰减^[12]可表示为

$$H = H_0 \exp(-c_m^* \cdot d), \quad (9)$$

式中： H_0 为光量子态的初始振幅； H 为光量子态在传输距离为 d 时的振幅。量子态能量衰减导致的链路衰减 S_{att} 可表示为

$$S_{att} = \lg \frac{H_0}{H} \cdot 10 = 10 \cdot c_m^* \cdot \lg e \cdot d. \quad (10)$$

当光波在海洋中传播时，海洋中存在一个与大气相似的透光窗口，即在光波段为 450~550 nm 的范围内，海水水分子的光谱吸收最小趋近于 0^[13]。为了减小海洋环境其他因素对光波的吸收，选取入射波长为 $\lambda = 450$ nm 的光信号进行水下量子通信，结合(8)~(10)式，可得矿物质颗粒群密度、传输距离与链路衰减的关系，如图 1 所示。

如图 1 所示，当传输距离较短、矿物质颗粒群密度较小时，链路衰减缓慢增加，此时光量子态的衰减带来的链路衰减较小。当传输距离和矿物质颗粒群密度越来越大时，链路衰减快速增大。根据仿真结果可知，当矿物质颗粒群密度达到 $5 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ ，传输距离达到最大 200 m 时，链路衰减可达到 12 dB。当传输距离为 50 m 时，随着矿物质颗粒群密度的增大，链路衰减由 0.098 dB 增加到 2.92 dB。当矿物质颗粒群密度为 $3 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 时，随着传输距离的

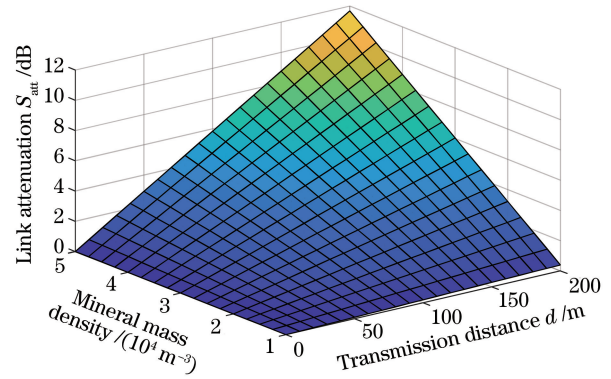


图 1 矿物质颗粒群密度、传输距离与链路衰减的关系
Fig. 1 Relationship among mineral particle group density, transmission distance and link attenuation

增大，链路衰减由 0.34 dB 增加到 6.74 dB。由此可见，在不同环境下，矿物质颗粒群对光量子态的影响都会造成链路不同程度的衰减，因此在实际水下量子通信时，可以根据不同环境因素，调整光波，改变光谱吸收，降低衰减，提高通信质量。

4 海洋矿物质颗粒对水下量子通信链路效率的影响

在进行量子通信之前，为了成功建立量子信道，应保证两个最基本的条件：第一，探测器能够将量子信号从背景噪声中检测出来；第二，在传输过程中量子信号的量子特性没有丢失。当探测器检测到的光信号的最少计数 C_{min} 与本底噪声计数 C_{acc} 的比值大于等于信噪比 S_{SNR} 时，探测器才能从背景噪声中提取出量子信号，即

$$\frac{C_{min}}{C_{acc}} \geq S_{SNR}. \quad (11)$$

由于量子比特具有叠加性，故量子信号的检测通常采用两个探测器。

探测器检测到的光信号的最少计数 C_{min} 和本底噪声计数 C_{acc} 分别满足

$$C_{min} = \nu' \eta_{link} \eta_{det1} \eta_{det2}, \quad (12)$$

$$C_{acc} = S_1 S_2 \Delta\tau, \quad (13)$$

式中： ν' 为光子的实际产生速率； η_{link} 为链路效率； η_{det1} 和 η_{det2} 为接收量子信号时所用的两个检测器的检测效率； S_1 和 S_2 为两个检测器的暗计数率； $\Delta\tau$ 为两个检测器的定时分辨率。

将(12)、(13)式代入(11)式，可得

$$\eta_{link} \geq S_{SNR} \frac{S_1 S_2 \Delta\tau}{\nu' \eta_{det1} \eta_{det2}}. \quad (14)$$

(14)式为量子通信中的单光子信号传输提供了最基本的保证条件。

量子信道传输的是携带 EPR 纠缠比特的量子信号,对于极化纠缠光子而言,为了使量子信号的信噪比违背 Bell 不等式,信噪比^[14]应约为 5.89:1。取典型值 $\eta_{\text{set1}} = \eta_{\text{set2}} = 0.3$, $S_1 = S_2 = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\Delta\tau = 5.10^{-9} \text{ s}$, $v' = 5.10^5 \text{ s}^{-1}$ 。由(14)式可计算出满足量子通信条件的信道衰减极值为

$$\eta_{\text{link}} \geq S_{\text{SNR}} \frac{S_1 S_2 \Delta\tau}{v' \eta_{\text{det1}} \eta_{\text{det2}}} \geq 10^{-6} = 60 \text{ dB}。 \quad (15)$$

由(15)式可知,当链路效率 η_{link} 的最小值为 10^{-6} ,即链路总损耗不超过 60 dB 时,量子通信可正常实现。

在水下进行量子通信时,由于受到环境因素的影响,海水中矿物质颗粒群对光量子态有不同程度的吸收和散射。故在传输过程中,丢失一个光子的概率 p_0 为

$$p_0 = 1 - \exp(-c_m^* \cdot d)。 \quad (16)$$

光子的实际产生速率 v' 定义为

$$v' = p_0 \cdot v'', \quad (17)$$

式中: v'' 为光子产生速率的典型值,取 5.10^5 s^{-1} 。结合(8)、(15)、(17)式,对链路效率、传输距离和矿物质颗粒群密度之间的关系进行仿真,结果如图 2 所示。

如图 2 所示,当传输距离最小、矿物质颗粒群密度最小时,链路效率 η_{link} 达到最大值,约为 2.5×10^{-5} ,大于衰减极值 10^{-6} ,满足通信条件。当传输距离不变时,随着矿物质颗粒群密度的逐渐变大,链路效率逐渐减小,最终趋近于 0,不满足量子通信条件。此时链路损耗较大,信息传输较为困难。当矿物质颗粒群密度不变且处于低密度(即 N 处于 $1 \times 10^4 \sim 1.25 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$)时,随着传输距离的增加,链路效率逐渐减小,当传输距离小于 50 m 时,链路效率满足通信条件。当传输距离从 50 m 逐渐增大到 200 m 时,链路效率达到最小值且小于 10^{-6} ,此

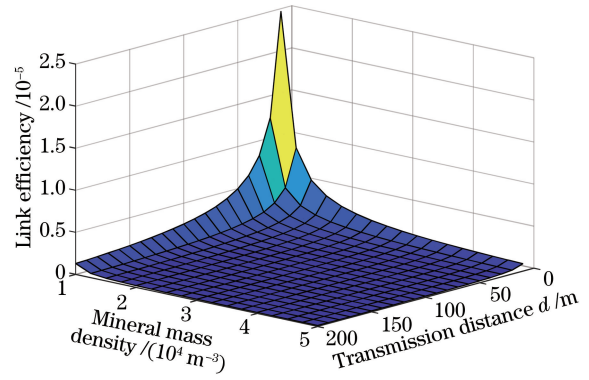


图 2 矿物质颗粒群密度、传输距离与链路效率的关系
Fig. 2 Relationship among mineral particle group density, transmission distance and link efficiency

时链路效率不满足理论值。故根据仿真结果可知,在进行信息传输时,50 m 范围内的传输距离和低于 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 的矿物质颗粒群密度能提供良好的通信环境。

5 海洋矿物质颗粒对水下量子通信信道容量的影响

选取退极化信道作为量子噪声信道模型,建立海洋矿物质颗粒群环境与退极化信道容量的关系。

退极化信道^[15]通常表示为

$$\varepsilon(\rho_i) = m_c \frac{\mathbf{I}}{2} + (1 - m_c)\rho_i, \quad (18)$$

式中: ρ_i 为第 i 个量子比特; m_c 为量子态去极化的概率; $\frac{\mathbf{I}}{2}$ 为量子的混合态; $\varepsilon(\rho_i)$ 为量子系统经过退极化信道后的状态。

设输入字符 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\rho_2 = |1\rangle\langle 1| = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,故退极化信道状态可表示为

$$\rho' = \varepsilon\left(\sum_i m_{ci}\rho_i\right) = \varepsilon(m_{c1}\rho_1 + m_{c2}\rho_2) = \frac{m_c}{2}\mathbf{I} + (1 - m_c)m_{c1}\rho_1 + (1 - m_c)m_{c2}\rho_2 = \begin{bmatrix} \frac{m_c}{2} + (1 - m_c)m_{c1} & 0 \\ 0 & \frac{m_c}{2} + (1 - m_c)m_{c2} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中: m_{ci} 为量子系统处于状态 ρ_i 的概率。

对应的冯·诺依曼熵^[16]可表示为

$$S[\epsilon(\sum_i m_{ci} \rho_i)] = -\text{tr}(\rho' \text{lb} \rho') = -\text{tr} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{m_c}{2} + (1-m_c)m_{c1} & 0 \\ 0 & \frac{m_c}{2} + (1-m_c)(1-m_{c1}) \end{bmatrix} \right\} \times$$

$$\text{lb} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{m_c}{2} + (1-m_c)m_{c1} & 0 \\ 0 & \frac{m_c}{2} + (1-m_c)(1-m_{c1}) \end{bmatrix} \right\} = -\frac{m_c + 2(1-m_c)m_{c1}}{2} \text{lb} \frac{m_c + 2(1-m_c)m_{c1}}{2} -$$

$$\frac{m_c + 2(1-m_c)(1-m_{c1})}{2} \text{lb} \frac{m_c + 2(1-m_c)(1-m_{c1})}{2}. \quad (20)$$

接收方接收到的冯·诺依曼熵可表示为

$$S[\epsilon(\rho_1)] = S[\epsilon(\rho_2)] = -\left[\frac{m_c}{2} \text{lb} \frac{m_c}{2} + \left(1 - \frac{m_c}{2}\right) \text{lb} \left(1 - \frac{m_c}{2}\right) \right] = H_2\left(\frac{m_c}{2}\right), \quad (21)$$

式中: $H_2\left(\frac{m_c}{2}\right)$ 为二元香农熵。

由(21)式可得

$$\sum_i m_{ci} S[\epsilon(\rho_i)] = m_c H_2\left(\frac{m_c}{2}\right) + \left(1 - \frac{m_c}{2}\right) H_2\left(1 - \frac{m_c}{2}\right) = H_2\left(\frac{m_c}{2}\right). \quad (22)$$

由(21)、(22)式可得退极化信道的信道容量为

$$C(m_c, m_{c1}) = \max_{m_c} \left\{ S[\epsilon(\sum_i m_{ci} \rho_i)] - \sum_i m_{ci} S[\epsilon(\rho_i)] \right\} =$$

$$\max_{m_c} \left\{ -\frac{m_c + 2(1-m_c)m_{c1}}{2} \text{lb} \frac{m_c + 2(1-m_c)m_{c1}}{2} + \right.$$

$$\left. \frac{m_c + 2(1-m_c)(1-m_{c1})}{2} \text{lb} \frac{m_c + 2(1-m_c)(1-m_{c1})}{2} \right\} - H_2\left(\frac{m_c}{2}\right). \quad (23)$$

在(23)式中, 当 $m_{c1} = \frac{1}{2}$ 时, 信道容量有最大值为

$$C\left(m_c, \frac{1}{2}\right) = 1 - H_2\left(\frac{m_c}{2}\right). \quad (24)$$

在海水矿物质颗粒群环境下, 量子退极化概率 $m_c^{[17]}$ 为

$$m_c = 1 - \exp(-c_m^* \cdot d). \quad (25)$$

由(24)、(25)式, 仿真得到退极化信道的信道容量与传输距离、海水矿物质颗粒群密度的关系, 如图 3 所示。

如图 3 所示, 当矿物质颗粒群密度为 $1 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 时, 随着传输距离的增加, 信道容量由 0.97 逐渐减小到 0.6, 矿物质颗粒群密度越大, 信道容量减小的速度越快。当传输距离小于 50 m 时, 随着矿物质颗粒群密度的增大, 信号传输过程中产生的消光作用增强, 导致量子信号产生退极化, 信道容量逐渐减小, 最小值趋近于 0.2。由图 3 可以得到与第 4 节类似的结论: 在 $d \leq 50 \text{ m}$ 且矿物质颗粒群密度低于 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 的环境下, 退极化信道容量均

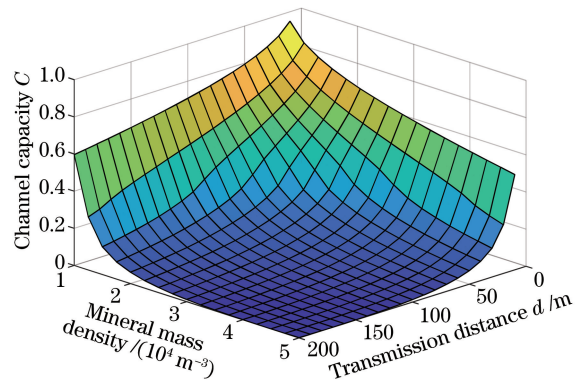


图 3 矿物质颗粒群密度、传输距离与信道容量的关系
Fig. 3 Relationship among mineral particle group density, transmission distance and channel capacity

大于 0.6, 通信环境相对较好, 通信质量较佳。但是实际海洋环境较复杂, 在进行水下量子通信时, 可考虑提高光子纠缠度或者提高光子的产生速率。

6 海洋矿物质颗粒对水下量子通信信道误码率的影响

在进行水下通信时, 采用量子密钥分配可以对

通信过程进行很好的加密,从而保证通信的绝对安全。在进行密钥分配时,系统不可避免地会受到海水信道的影响,尤其是海水中矿物质颗粒群的光学性质,可能会在传输过程中对光子产生干扰,降低比特数的生成速率。

在海水信道中,当传输距离达到 d 后,保证偏振态未被干扰的光子数目^[18]可表示为

$$N(d) = N_0 \exp(-c_m^* d), \quad (26)$$

式中: N_0 为初始时刻发射光子的总数目; $N(d)$ 为在海水信道中传输距离 d 后剩下的光子数。

基于 BB84 协议,在不考虑散射光子噪声的影响下,量子误码率(QBER)可表示为

$$Q_{\text{QBER}} = \frac{E_{\text{Error}}}{N(d)\eta + 2 \cdot E_{\text{Error}}}, \quad (27)$$

式中: η 为探测器效率(一般取典型值 30%); E_{Error} 为接受到的误码比特率,计算公式为

$$E_{\text{Error}} = I_{\text{dc}} + \frac{R_d(\lambda)A'\Delta t'\Delta\lambda\Omega}{4hc\Delta t}, \quad (28)$$

式中: I_{dc} 为探测器暗计数; Δt 为光脉冲周期; A' 为接受孔径面积; $\Delta t'$ 为接收器门时间; $\Delta\lambda$ 为谱线宽度; h 为普朗克常数; c 为光速; Ω 为探测器视场立体角,表示为

$$\Omega = \pi[1 - \cos(\theta_{\text{FOV}})], \quad (29)$$

式中: θ_{FOV} 为视场角。

在(28)式中, $R_d(\lambda)$ 为下行环境辐照度谱^[19],可表示为

$$R_d(\lambda) = E_0(\lambda)\exp[-K(\lambda)z], \quad (30)$$

式中: $E_0(\lambda)$ 为海平面上的辐照度谱,此处以多云的白天为天气环境,取值为 $10/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$; $K(\lambda)$ 为海水平均漫衰减系数,取一般值 0.0184 m^{-1} ; z 为在水下进行密钥分发的深度。其余参数取值情况如表 1 所示。

表 1 误码率的参数取值

Table 1 Parameter values of error rate

Parameter	$\Delta t / \text{ms}$	A' / mm^2	$\Delta t' / \text{ms}$	$\Delta\lambda / \mu\text{m}$	$\theta_{\text{FOV}} / (^\circ)$	I_{dc}	z / m	λ / nm
Value	35	30	200	0.12	10	10^{-6}	200	450

根据(26)~(29)式,仿真得到误码率与传输距离、矿物质颗粒群密度的关系,如图 4 所示。

如图 4 所示,在水下 200 m 处的海洋环境中进行信息传输时,由于存在背景光等其他干扰因素,随着传输距离的增加,误码率呈指数增大,光子能量衰减,检测端接收到的光子数减少;当矿物质颗粒群密度达到最大理论值时,误码率接近 0.84×10^{-5} 。由于信号为单光子,因此在实际环境中,为了提高误码率,可以根据实际情况调整激光脉冲的发射频率,减少背景噪声,或者利用滤波技术减小海洋环境中的背景光的影响。

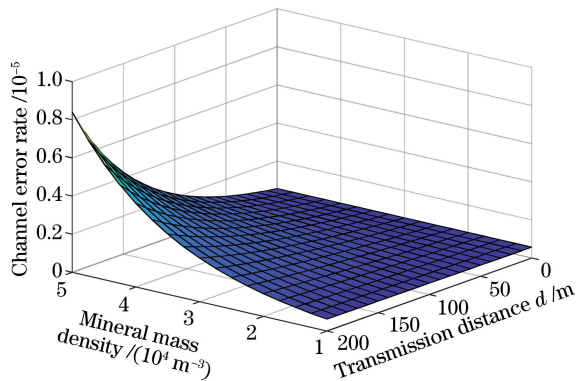


图 4 矿物质颗粒群密度、传输距离与信道误码率的关系

Fig. 4 Relationship among mineral particle group density, transmission distance and channel error rate

7 结 论

研究了海洋矿物质颗粒对水下量子通信性能的影响。首先分析了海洋矿物质颗粒的消光特性,建立了海洋矿物质颗粒群密度、传输距离与链路衰减和链路效率的关系模型并进行了仿真。针对退化信道,建立了矿物质颗粒群密度、传输距离与信道容量、信道误码率的关系并进行了仿真。仿真结果表明,当传输距离为 50 m 时,随着矿物质颗粒群密度的增大,链路衰减由 0.098 dB 增加到 2.92 dB。当传输距离最小、矿物质颗粒群密度最小时,链路效率达到最大值,约为 2.5×10^{-5} ;当矿物质颗粒群密度为 $1 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ 时,随着传输距离的增加,信道容量由 0.97 逐渐减小到 0.6;在水下 200 m 处的海洋环境中进行信息传输时,由于存在背景光等其他干扰因素,随着传输距离的增加,误码率呈指数增大。因此,在实际传输过程中,应根据环境情况,自适应调整发送端和接收端的各项参数,确保良好的通信质量。

参 考 文 献

- [1] Lanzagorta M. Underwater communications [J]. Synthesis Lectures on Communications, 2012, 5(2): 1-129.
- [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] Mastriani M, Iyengar S S, Kumar K J L. Bidirectional teleportation for underwater quantum communications [J]. Quantum Information Processing, 2021, 20(1): 1-23.
- [4] He Y F, Zhao Y K, Guo J R, et al. Statistical fluctuation analysis of quantum key distribution protocols based on heralded pair coherent state [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0727002.
何业锋, 赵艳坤, 郭佳瑞, 等. 基于标记配对相干态的量子密钥分配协议的统计涨落分析 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0727002.
- [5] Zhang X Z, Xu X, Liu B Y, et al. Influence of marine aerosols on performance of free-space quantum communication [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2027001.
张秀再, 徐茜, 刘邦宇, 等. 海洋气溶胶对自由空间量子通信性能影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2027001.
- [6] Bouchard F, Sit A, Hufnagel F, et al. Quantum cryptography with twisted photons through an outdoor underwater channel [J]. Optics Express, 2018, 26(17): 22563-22573.
- [7] Guo Y, Xie C L, Huang P, et al. Channel-parameter estimation for satellite-to-submarine continuous-variable quantum key distribution [J]. Physical Review A, 2018, 97(5): 052326.
- [8] Woźniak S B, Stramski D. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms [J]. Applied Optics, 2004, 43(17): 3489-3503.
- [9] Yang Y F, Qin J H, Li T. Study on the light scattering of suspended particles in seawater [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(7): 145-150.
杨玉峰, 秦建华, 李挺. 海水中悬浮物的光散射特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 145-150.
- [10] Zhou W, Cao W X, Li C. Modeling absorption and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(1): 22-26.
周雯, 曹文熙, 李彩. 海水中矿物质颗粒吸收和散射特性 Mie 理论分析 [J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 22-26.
- [11] Stramski D, Bricaud A, Morel A. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community [J]. Applied Optics, 2001, 40(18): 2929-2945.
- [12] Lanzagorta M, Uhlmann J, Jitrik O, et al. Quantum computation of the electromagnetic cross section of dielectric targets [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9829: 98291I.
- [13] Duntley S Q. Light in the sea [J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [14] Shi C Y. Study on modeling and simulation of satellite-ground quantum key distribution communication link [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 44-46.
史春燕. 星地量子密钥分配通信链路建模与仿真研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 44-46.
- [15] Fan H Y, Hu L Y. Entangled state representation theory of quantum decoherence in open systems [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 36-65.
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: 36-65.
- [16] Balcerzak A, Marosek K. Doubleverse entanglement in third quantized non-minimally coupled varying constants cosmologies [J]. The European Physical Journal C, 2020, 80(8): 709.
- [17] Nie M, Ren J, Yang G, et al. Influences of PM_{2.5} 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. PM_{2.5} 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.
- [18] Shi P, Zhao S C, Li W D, et al. Bit error rate and key generation rate for underwater quantum key distribution [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(4): 114-120.
史鹏, 赵士成, 李文东, 等. 水下量子密钥分配的误码率和成码率 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 114-120.
- [19] Curtis D M. Light and water: radiative transfer in natural waters [M]. Manhattan: Academic Press, 1994: 110-135.