

卷云对自由空间星地量子通信信道的影响

张秀再^{1,2*}, 徐茜¹, 刘邦宇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 卷云对量子通信光信号的传输有极大的影响。根据卷云特性建立了卷云冰晶粒子的分布模型,研究了卷云的消光特性,并根据卷云的散射特性,分析了卷云冰水含量、传输距离、链路消光特性、信道容量和信道纠缠度衰减的定量关系,研究了噪声影响下隐形传态保真度的变化,并进行了仿真实验。实验结果表明,当传输距离为 3 km 时,在卷云冰水含量(体积质量)为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的条件下,对应的链路衰减、信道容量和信道纠缠度分别为 $0.05 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $0.94 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.52,而在卷云冰水含量(体积质量)为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的条件下,对应的链路衰减、信道容量和信道纠缠度分别为 $0.20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $0.82 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.07。由实验结果可见,自由空间量子通信信道的性能在卷云的影响下均发生了不同程度的变化。因此,在进行量子通信时,需考虑卷云的影响,根据卷云的变化调整性能参数,以提高通信质量。

关键词 量子光学; 量子通信; 卷云; 链路消光特性; 纠缠度衰减; 隐形传态保真度

中图分类号 TN929.1; O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2027001

Influence of Cirrus Clouds on Space-to-Earth Quantum Communication Channels in Free Space

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

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

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

Abstract Cirrus clouds have a great impact on optical signal transmission in quantum communication. According to the cirrus cloud characteristics, the cirrus cloud ice particle distribution model is established, and the extinction properties of cirrus clouds are investigated. In addition, according to the scattering features, the quantitative relationships among the cirrus cloud ice water content, transmission distance, link extinction characteristics, channel capacity, and channel entanglement attenuation are analyzed. The change of teleportation fidelity under the influence of noise is studied and the simulation experiment is conducted. The experimental results show that when the transmission distance is 3 km and the cirrus cloud ice water content (volume mass) is $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, the corresponding link attenuation, channel capacity and channel entanglement are $0.05 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, $0.94 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ and 0.52, respectively. In contrast, they are $0.20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, $0.82 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ and 0.07, respectively, when the cirrus cloud ice water content (volume mass) is $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. From these experimental results, one can see that the performance of the free-space quantum communication channel changes to different degrees under the influence of cirrus clouds. Therefore, the influence of cirrus clouds should be considered in quantum communication, and various performance parameters should be adjusted according to the change of cirrus clouds in order to ensure the communication quality.

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-04-27

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

Key words quantum optics; quantum communication; cirrus clouds; link extinction characteristics; entanglement attenuation; teleportation fidelity

OCIS codes 270.5565; 270.5585; 010.1615

1 引言

量子信息主要是量子信息系统中具有量子交叉性、并行性和不可复制性等特征的全新形式的信息。量子通信是利用量子信息理论中的量子纠缠效应来传递和表达相关信息的一种新型通信方式,具体的量子通信主要包括量子密码通信、远距离量子传递和量子密码编程等^[1]。在理论上,将量子态作为隐秘传递信息的模型或信息载体,可使信息传递量加大,安全性好,效率高。

自由空间的量子通信会不可避免地受到空间物理环境的影响,造成通信质量下降。刘涛等^[2]在不同波长信号下研究了雨、雪及雾霾三种不同天气对自由空间量子通信系统安全密钥率的影响,为自由空间量子通信系统实际安全密钥率的提高提供了理论依据。孙俊立等^[3]对自由空间量子通信数据传输中空气污染导致的数据传输质量变化进行了分析,并基于波特均衡调节,结合大气污染干扰抑制方法,提出了一种通信数据传输优化方法以提高数据传输质量。聂敏等^[4]建立了不同强度降雪与地表附近量子通信信道性能参数之间的关系,并分析了降雪天气下各性能参数的变化,为降雪天气地表附近量子通信参数的调整提供了理论参考。张秀再等^[5]分析了星地量子通信的信道参数在海洋气溶胶影响下的变化,为海洋气溶胶影响下量子通信传输系统可靠性的提高提供了一定的理论参考。刘邦宇等^[6]对煤烟凝聚粒子环境下量子卫星通信性能的变化进行了研究,为煤烟环境下量子通信系统的参数调整提供了一定的理论依据。

卷云几乎覆盖了天空面积的 30%,它与太阳辐射、地表辐射相互作用,能很好地调节了地球-大气之间的平衡能力^[7]。卷云几乎全由冰晶粒子组成,卷云中的冰晶粒子对光具有散射吸收作用。曹亚楠等^[8]利用大气辐射传输软件模拟计算了 0.4~2.5 μm 波段的卷云大气反射率,分析了卷云大气的反射率随波长、光学厚度、有效尺度、卷云高度和地表类型的变化情况。Liou^[9]在太阳光谱的可见和近红外波段,通过简化的辐射传输计算,得到了几层卷云的反射率、透射率和吸收率随天顶角的变化。Bantges 等^[10]利用英国的 BAe 146 飞机在卷云耦合云辐射实验中获得的中远红

外最低点辐射测量数据,评估了各种卷云光学特性模型的性能。由于卷云内的冰晶粒子具有多样性,本文建立了卷云冰晶粒子的分布模型,分析了各形状冰晶粒子的散射消光特性,并计算了卷云的平均散射特性参数,对链路消光特性的变化进行了分析。研究了比特翻转信道的容量变化,分析了信道纠缠度衰减及隐形传态保真度的变化并进行了仿真实验,为大气卷云环境下量子通信信道参数的调整提供了理论参考。

2 卷云对链路特性的影响

2.1 卷云散射模型的建立

大气中的卷云是大气的上升及潮湿空气的深对流引起的,主要由冰晶粒子组成,冰晶粒子由于温度、湿度以及碰撞合并过程的不同而形状不一。观测资料显示,卷云中冰晶粒子形状主要可分为以下几类:平板状、棱柱状、子弹玫瑰状和聚合物状。常用 Gamma 分布表示卷云中冰晶粒子的分布^[11],即

$$n(L) = NL^{\frac{1-3b}{b}} \exp\left(-\frac{2L}{d_e b}\right), \quad (1)$$

式中: $n(\cdot)$ 为卷云粒子分布; L 为粒子最大尺度; N 为冰晶粒子总浓度; d_e 为冰晶粒子的有效尺寸; b 为有效方差。

通常用与粒子最大尺度 L 相关的有效尺寸 d_e 来表示冰晶粒子的尺寸大小,冰晶粒子的有效尺寸^[12]可表示为

$$d_e = \frac{\exp\left[3 \sum_{n=0}^4 b_n (\ln L)^n\right]}{\exp\left[2 \sum_{n=0}^4 a_n (\ln L)^n\right]}, \quad (2)$$

式中: n 为冰晶粒子种类数; a_n 和 b_n 分别为等效面积球和等效体积球直径的拟合系数。 a_n 、 b_n 的值如表 1、2^[13]所示。

由于卷云粒子形状为不规则的非球形,尺度大于入射波长,可用非球形粒子散射理论处理卷云粒子的散射问题。首先将单个冰晶粒子作为切入点,根据几何光学法和异常衍射散射理论,计算六种不同形状冰晶粒子的消光效率因子^[13]。按照每种冰晶粒子在卷云中的比例,将冰晶粒子消光效率因子与卷云粒子分布模型相结合,分析卷云粒子群的平均消光特性。

表 1 等效面积球直径的拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of equivalent area sphere diameter

Ice crystal particle shape	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Hexagonal plate	0.43773	0.75497	0.19033×10^{-1}	0.35191×10^{-3}	-0.70782×10^{-4}
Hexagonal prism	0.33401	0.36477	0.30855	-0.55631×10^{-1}	0.30162×10^{-2}
Hollow hexagonal prism	0.33401	0.36477	0.30855	-0.55631×10^{-1}	0.30162×10^{-2}
Four bullet roses	0.15909	0.84308	0.70161×10^{-2}	-0.11003×10^{-2}	0.45161×10^{-4}
Space bullet roses	0.14195	0.84394	0.72125×10^{-2}	-0.11219×10^{-2}	0.45819×10^{-4}
Polymer	-0.47737	1.00260	-0.10030×10^{-2}	0.15166×10^{-3}	-0.78433×10^{-5}

表 2 等效体积球直径的拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of equivalent volume ball diameter

Ice crystal particle shape	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Hexagonal plate	0.31229	0.80874	0.29287×10^{-2}	-0.44378×10^{-3}	-0.23109×10^{-4}
Hexagonal prism	0.30581	0.26252	0.35458	-0.63202×10^{-1}	0.33755×10^{-2}
Hollow hexagonal prism	0.24568	0.26202	0.35479	-0.63236×10^{-1}	0.33773×10^{-2}
Four bullet roses	-0.09794	0.85683	0.29483×10^{-2}	-0.14341×10^{-2}	0.74627×10^{-4}
Space bullet roses	-0.10318	0.86290	0.70665×10^{-3}	-0.11055×10^{-2}	0.57906×10^{-4}
Polymer	-0.70160	0.99215	-0.29322×10^{-2}	0.40492×10^{-3}	-0.18841×10^{-4}

由异常衍射近似理论可知,当球形粒子半径为 r 时,消光效率因子可表示为

$$Q'_{\text{ext}}(\beta, \rho) = 2 - 4 \exp(-\rho \tan \beta) \times \left[\frac{\cos \beta}{\rho} \sin(\rho - \beta) + \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2 \cos(\rho - 2\beta) \right] + 4 \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2 \cos 2\beta, \quad (3)$$

式中: ρ 为相位延迟, $\rho = \frac{4\pi r |m_r - 1|}{\lambda}$, 其中 m_r 为复折射率实部, λ 为入射光波长; β 为相位变化, $\beta = \arctan\left(\frac{m_i}{m_r - 1}\right)$, 其中 m_i 为复折射率虚部。

非球形粒子的消光效率因子可表示为

$$Q''_{\text{ext}}(\beta, \rho_e, \alpha) = 2 \left[1 - \exp\left(-\frac{2}{3} \rho_e \tan \beta\right) \cos\left(\frac{2}{3} \rho_e + \alpha\right) \right], \quad (4)$$

式中: ρ_e 为有效相位延迟, $\rho_e = \frac{2\pi d_e |m_r - 1|}{\lambda}$; α 为非球形粒子对的平均相位偏移。

光线入射到粒子时,考虑到光线在粒子内部的反射、二次折射等,采用组合法计算非球形冰晶粒子的消光效率因子,即

$$Q_{\text{ext}}(L, m_r, m_i) = (1 - \xi) Q'_{\text{ext}}(\beta_1, \eta_1 \rho_e) + \xi Q''_{\text{ext}}(\beta_2, \eta_2 \rho_e, \alpha), \quad (5)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \xi, \eta_1, \eta_2, \alpha$ 为不同形状冰晶粒子的各项系数,取值由文献[13]给出。

不同形状冰晶粒子的消光效率因子与粒子最大尺度 L 之间的关系如图 1 所示。图 1 (a)~(f) 分别

为六角平板、六棱柱、中空六棱柱、四瓣子弹玫瑰、空间子弹玫瑰和聚合物状冰晶粒子的消光效率因子与粒子最大尺度之间的关系。由图 1 可知,各种形状冰晶粒子的消光效率因子在粒子最大尺寸较小时波动较大,且围绕 2 不断波动;随着最大尺寸的增大,各种冰晶粒子的消光效率因子的波动趋于平缓,且趋于 2。从图 1 可以看出,各种冰晶粒子都存在一个或多个振荡峰,且不同形状冰晶粒子的振荡峰位置及幅度也不同。

2.2 链路消光特性的变化

当给定卷云中冰晶粒子尺度分布 $n(L)$ 和各种形状粒子的粒子数占比 $f_i(L)$ 时,群体卷云粒子的平均消光效率因子^[14]可表示为

$$\langle Q_{\text{ext}} \rangle = \frac{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \left[\sum_{i'=1}^M f_{i'}(L) Q_{e,i'}(L) A_{i'}(L) \right] n(L) dL}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \left[\sum_{i'=1}^M f_{i'}(L) A_{i'}(L) \right] n(L) dL}, \quad (6)$$

式中: $A_{i'}(L)$ 为各种形状卷云冰晶粒子的等效球面积; $Q_{e,i'}(L)$ 为第 i' 种形状冰晶粒子的消光效率因子; M 为卷云中的粒子种类数; L_{\min} 和 L_{\max} 分别为粒子分布中的最小、最大尺寸。考虑到冰水含量 (I_{IWC} , 体积质量, 全文同), 结合卷云散射特性模型, 可得出卷云平均消光系数^[15]为

$$k_{\text{ext}} = \frac{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} [A(L) \langle Q_{\text{ext}} \rangle n(L)] dL}{I_{\text{IWC}}}, \quad (7)$$

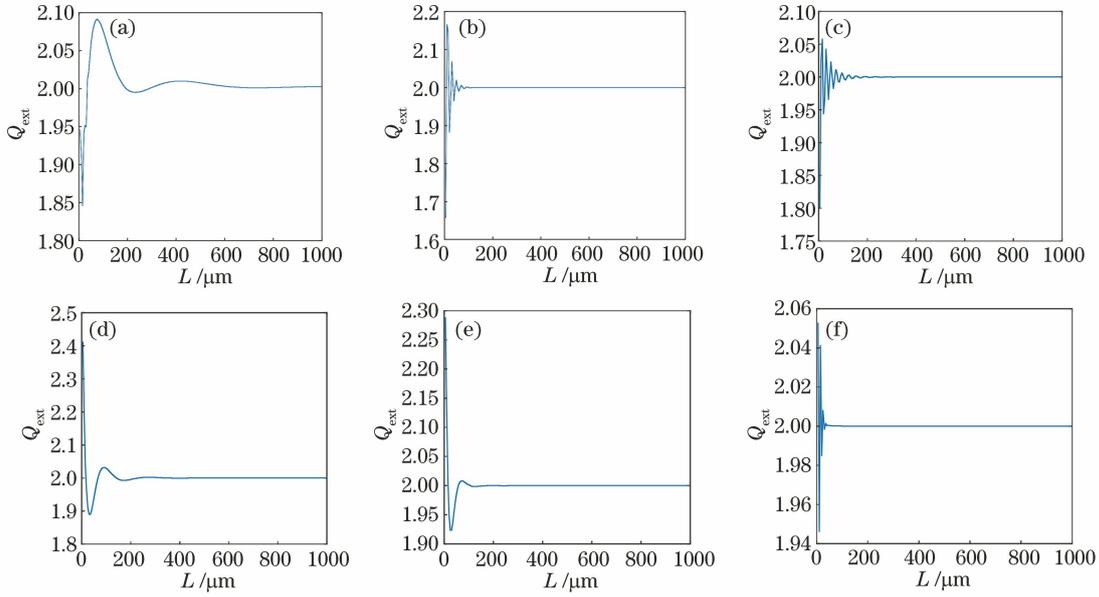


图 1 不同形状冰晶粒子的消光效率因子与粒子最大尺度之间的关系。(a)六角平板;(b)六棱柱;(c)中空六棱柱;(d)四瓣子弹玫瑰;(e)空间子弹玫瑰;(f)聚合物状

Fig. 1 Relationships between extinction efficiency factor and maximum particle size for ice crystal particles with different shapes. (a) Hexagonal plate; (b) hexagonal prism; (c) hollow hexagonal prism; (d) four bullet roses; (e) space bullet roses; (f) polymer

式中: $A(L)$ 为卷云冰晶粒子的等效球面积,

$$A(L) = \frac{\pi \exp \left[2 \sum_{n=0}^4 a_n (\ln L)^n \right]}{4}.$$

冰水含量的表达式为

$$I_{\text{IWC}} = \rho_{\text{ice}} \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} [V(L)n(L)] dL, \quad (8)$$

式中: $V(L)$ 为卷云冰晶粒子的等效球体积; ρ_{ice} 为冰晶粒子密度。

量子信息在自由空间传输时,卷云引起的衰减^[16]为

$$E = E_0 \exp(-k_{\text{ext}} d), \quad (9)$$

式中: E_0 为量子信息传输前的总能量; d 为传输距离。取对数运算,可得出星地传输链路衰减因子为

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

忽略大气中其他粒子的影响,链路衰减与卷云冰水含量、传输距离之间的关系如图 2 所示。由图 2 可知,当传输距离一定时,随着卷云冰水含量的降低,通信链路衰减增大;当冰水含量保持不变时,随着通信传输距离的增加,链路衰减呈上升趋势,且在 $I_{\text{IWC}} = 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $d = 3 \text{ km}$ 时,链路衰减取到最大值 0.63。当传输距离为 3 km,卷云冰水含量由 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,链路衰减由 $0.05 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 增加到 $0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。因此,传输距离越大,卷云冰水含量越低,链路衰减就越大。这是由于冰水含量越低,卷云内的冰晶粒子含量越

高,粒子对光的反射和二次折射越强,能量衰减严重,可根据卷云冰水含量的高低调整光信号的发射功率,以此改善量子通信的传输性能。

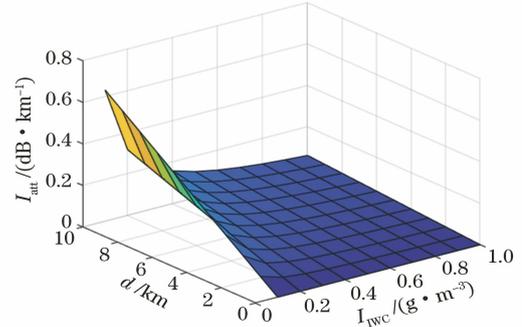


图 2 链路衰减与卷云冰水含量、传输距离之间的关系
Fig. 2 Relationship among link attenuation, cirrus cloud ice water content, and transmission distance

3 卷云对量子通信信道容量的影响

光子在传输时受到卷云的影响发生能量衰减,量子相关性受到破坏,信道性能受到极大影响。选取比特翻转信道作为噪声信道,研究信道容量的变化。比特翻转信道的两个运算元 D_0 和 D_1 ^[17] 可表示为

$$\begin{cases} D_0 = \sqrt{p} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \sqrt{p} \mathbf{I} \\ D_1 = \sqrt{1-p} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \sqrt{1-p} \mathbf{X} \end{cases}, \quad (11)$$

式中： p 为受到卷云影响量子比特状态在比特翻转信道中由 $|1\rangle$ 变换到 $|0\rangle$ 的概率； I 和 X 为基本力学算子。

则一个量子系统经过比特翻转信道后的状态演化可表示为

$$\epsilon(\rho) = (1-p)\rho + pX\rho X, \quad (12)$$

式中： ρ 为密度算子。

量子系统为 $\{p_i, \rho_i\}$ ，其中 p_i 为量子系统处于状态 ρ_i 的概率。输入字符 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|$ 、 $\rho_2 = |1\rangle\langle 1|$ ，经过比特翻转信道后，密度算子的演化为

$$\begin{aligned} \epsilon\left(\sum_i p_i \rho_i\right) &= p_1 \epsilon(\rho_1) + (1-p_1) \epsilon(\rho_2) = \\ & \begin{bmatrix} p_1 + p - 2p_1 p & 0 \\ 0 & 1 - p_1 - p - 2p_1 p \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

该演化对应的冯·诺伊曼熵可表示为

$$\begin{aligned} S(\rho) &= -\sum_i \lambda_i \text{lb} \lambda_i = \\ & -(p_1 + p - 2p_1 p) \text{lb}(p_1 + p - 2p_1 p) - \\ & (1 - p_1 - p - 2p_1 p) \text{lb}(1 - p_1 - p - 2p_1 p) = \\ & H(p_1 + p - 2p_1 p), \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $H(p)$ 为二元熵函数， $H(p) = -p \text{lb} p - (1-p) \text{lb}(1-p)$ ； λ_i 为 ρ 的固有本征值。比特翻转信道的信道容量^[18]为

$$\begin{aligned} C &= \max\{S[\epsilon(p_i \rho_i)] - \sum_i p_i S[\epsilon(\rho_i)]\} = \\ & \max[H(p_1 + p - 2p_1 p) - H(p)]. \end{aligned} \quad (15)$$

当 p_1 取 $1/2$ 时， $S[\epsilon(p_i \rho_i)]$ 有最大值 1，则比特翻转信道的信道容量为

$$C = 1 - H(p), \quad (16)$$

式中： p 为受卷云影响传输过程中丢失一个光量子的概率，表达式为

$$p = 1 - \exp(-k_{\text{ext}} d). \quad (17)$$

比特翻转信道的信道容量与卷云冰水含量、传输距离之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知，当卷云冰水含量一定时，传输距离越远，比特翻转信道的信道容量越小；当传输距离不变时，随着卷云冰水含量的降低，比特翻转信道的信道容量呈下降趋势，冰水含量越低，信道容量的变化越大。当卷云冰水含量为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、传输距离为 10 km 时，信道容量有最小值 $0.6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当传输距离为 3 km，卷云冰水含量由 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，信道容量由 $0.94 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小至 $0.82 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此，卷云及传输距离均对信道容量有一定的影响，可通过调整发送端脉冲的光子数量来提高信道容量。

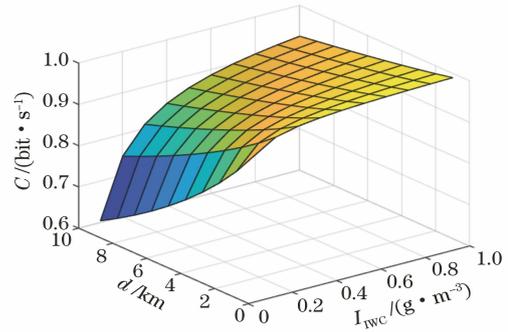


图 3 信道容量与卷云冰水含量、传输距离之间的关系
Fig. 3 Relationship among channel capacity, cirrus cloud ice water content, and transmission distance

4 比特翻转噪声影响下的隐形传态保真度

由文献[19]可知，引入比特翻转信道后，噪声影响下的隐形传态保真度为

$$F_{\text{av}} = \frac{4p^2(1-\mu)}{3} + \frac{4p(\mu-1)}{3} + 1, \quad (18)$$

式中： μ 为比特翻转信道在使用时内存量的量化。当 $\mu=0$ 时，光量子独立通过噪声信道，信道会衰减成无记忆的比特翻转信道，此时，隐形传态平均保真度为

$$F_{\text{av}} = \frac{4p^2}{3} - \frac{4p}{3} + 1; \text{ 当 } \mu=1 \text{ 时, 光量子完全失联。}$$

引入比特翻转信道后，噪声影响下的隐形传态保真度与参数 μ 、卷云噪声概率 p 之间的关系如图 4 所示。由图 4 可知，当 $\mu=0$ 时，隐形传态过程未引入记忆信道，量子隐形传态受到比特翻转噪声信道的影响，当噪声的概率为 0.5 时，保真度降到最低，为 0.67；由于纠缠粒子的特殊性，当噪声概率为 0 和 1 时，随着参数 μ 的变化，保真度的值均为 1。引入记忆信道后，可以看到隐形传态的保真度有明显提升，且当 $\mu=1$ 时，保真度为 1。因此，卷云对隐

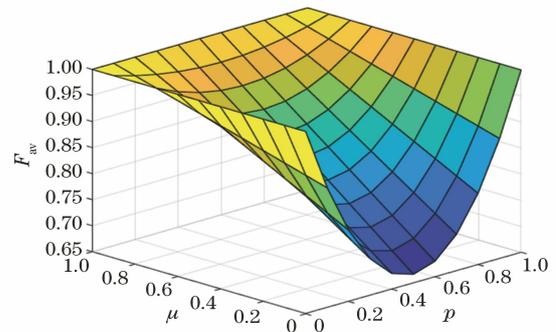


图 4 隐形传态保真度与参数 μ 、卷云噪声概率 p 之间的关系
Fig. 4 Relationship among teleportation fidelity, parameters μ , and cirrus cloud noise probability

形态的保真度有较为明显的影响。

5 卷云影响下信道纠缠度的衰减

选择幅值阻尼信道作为噪声信道,研究卷云对信道纠缠度的影响。光子信号在星地传输过程中受到卷云的影响,状态发生跃迁,信道对量子态的么正变换 $U^{[20]}$ 表示为

$$U: \begin{cases} |0\rangle_s |0\rangle_j \rightarrow |0\rangle_s |0\rangle_j \\ |1\rangle_s |0\rangle_j \rightarrow \sqrt{1-p} |1\rangle_s |0\rangle_j + \sqrt{p} |0\rangle_s |1\rangle_j \end{cases}, \quad (19)$$

式中: $|0\rangle_s, |1\rangle_s$ 分别为量子系统基态、激发态; $|0\rangle_j, |1\rangle_j$ 为卷云的计算基矢。

量子系统的复合量子比特纯态^[21]为

$$|\varphi\rangle = g_1 |00\rangle_s + g_2 |11\rangle_s, \quad (20)$$

式中: g_1, g_2 分别为复合量子比特在状态 $|00\rangle_s, |11\rangle_s$ 上出现的概率,且 $g_1^2 + g_2^2 = 1$ 。当卷云环境处于状态 $|0\rangle$ 时,幅值阻尼信道下复合系统的量子态可表示为

$$|\phi\rangle_f = g_1 |00\rangle_s |00\rangle_j + g_2 \sqrt{p} [|11\rangle_s |00\rangle_j + \sqrt{1-p} (|10\rangle_s |01\rangle_j + |01\rangle_s |10\rangle_j) + \sqrt{p} |00\rangle_s |11\rangle_j], \quad (21)$$

式中: $|00\rangle_j, |11\rangle_j, |01\rangle_j, |10\rangle_j$ 为卷云中量子比特不同的状态; $|00\rangle_s, |11\rangle_s, |10\rangle_s, |01\rangle_s$ 为量子系统中量子比特不同的状态。

求偏迹后得到纠缠系统的约化密度矩阵,其包含系统信息。因此信道纠缠度的衰减^[22]为

$$J_c = 2(1-p)(g_1 g_2 - g_2^2 p). \quad (22)$$

取 $g_1 = 1/\sqrt{2}, g_2 = 1/\sqrt{2}$ 进行仿真,可得出噪声影响下信道纠缠度与卷云冰水含量、传输距离之间的关系,如图 5 所示。由图 5 可知,当卷云冰水含量一定时,随着传输距离的增大,纠缠度不断降低;当

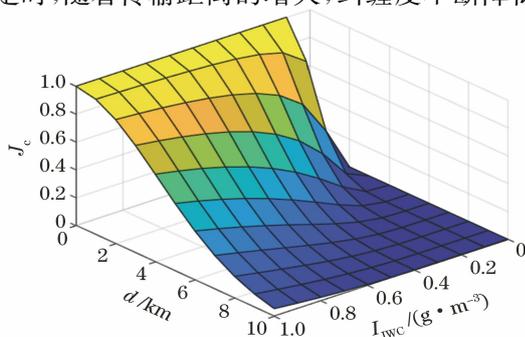


图 5 信道纠缠度与卷云冰水含量、传输距离之间的关系
Fig. 5 Relationship among channel entanglement, cirrus cloud ice water content, and transmission distance

传输距离不变时,随着卷云冰水含量的降低,能量衰减增大,纠缠度呈下降趋势。当传输距离为 3 km,冰水含量由 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,信道纠缠度由 0.52 降低至 0.07。随着冰水含量的降低,卷云内冰晶粒子浓度增加,量子的相关性受到严重破坏,信道纠缠度衰减增大。因此,卷云冰水含量及传输距离都对信道纠缠度有较大的影响,可在卷云冰水含量较高时增加光子脉冲强度,降低量子跃迁概率,提高传输质量。

6 结 论

研究了卷云对自由空间量子通信信道的影响,建立了卷云冰晶粒子的散射模型,根据卷云的散射消光特性,结合卷云冰晶粒子谱分布,计算了通信链路的衰减。针对比特翻转信道,建立了卷云冰水含量和传输距离与比特翻转信道信道容量之间的关系,研究了比特翻转噪声影响下隐形传态保真度的变化。基于幅值阻尼信道下量子的跃迁,分析了信道纠缠度的衰减,并进行了仿真模拟。仿真结果表明,随着卷云冰水含量的降低及传输距离的增大,链路衰减、信道容量、隐形传态保真度均有不同程度的变化,链路衰减呈上升趋势,信道容量和隐形传态保真度呈下降趋势。因此,在大气环境中进行量子通信时,需考虑卷云对通信性能的影响,根据卷云的变化对通信参数进行调整,以提高通信质量。

参 考 文 献

[1] Chi Y P, Chen C X, Wang Z Q. Advances in networking technology of quantum secure communication network [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2019, 27(2): 9-18.
池亚平, 陈纯霞, 王志强. 量子保密通信网络组网技术研究进展[J]. 北京电子科技学院学报, 2019, 27(2): 9-18.

[2] Liu T, Zhu C, Sun C Y, et al. Influences of different weather conditions on performance of free-space quantum communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0227001.
刘涛, 朱聪, 孙春阳, 等. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0227001.

[3] Sun J L, Zheng J W. Effect of air pollution on data transmission quality in free space quantum communication [J]. Environmental Science and Management, 2019, 44(7): 64-67.
孙俊立, 郑静雯. 大气污染对自由空间量子通信数据

- 传输质量的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(7): 64-67.
- [4] Nie M, Wang C X, Yang G, et al. Influence of snowfall on free-space quantum channel near earth surface and parameter simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(3): 030301.
聂敏, 王超旭, 杨光, 等. 降雪对地表附近自由空间量子信道的影响及参数仿真[J]. 物理学报, 2021, 70(3): 030301.
- [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] Liu B Y, Zhang X Z, Xu X. Influence of soot agglomerated particles on quantum satellite communication performance[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0327001.
刘邦宇, 张秀再, 徐茜. 煤烟凝聚粒子对量子卫星通信性能的影响 [J]. 光学学报, 2020, 40 (3): 0327001.
- [7] Wang X D. Radiation characteristics of water clouds and cirrus clouds [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 35-36.
王小东. 水云及卷云辐射特性参数化[D]. 成都: 电子科技大学, 2006: 35-36.
- [8] Cao Y N, Wei H L, Chen X H, et al. Simulations of the reflectance of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (8): 0801004.
曹亚楠, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波反射特性的模拟计算研究 [J]. 光学学报, 2012, 32 (8): 0801004.
- [9] Liou K N. Transfer of solar irradiance through cirrus cloud layers [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1973, 78(9): 1409-1418.
- [10] Bantges R J, Brindley H E, Murray J E, et al. A test of the ability of current bulk optical models to represent the radiative properties of cirrus cloud across the mid- and far-infrared [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(21): 12889-12903.
- [11] Guo L L, Wang M J. Polarized radiative transfer characteristics of ice cloud atmospheres at large zenith angles [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (11): 1101002.
郭镭力, 王明军. 大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1101002.
- [12] Zhang L. Study on the radiative transmission and scattering properties of cirrus clouds [D]. Xi'an: Xidian University, 2010: 21-22.
张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 21-22.
- [13] Yang P, Liou K N, Wyser K, et al. Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105 (D4): 4699-4718.
- [14] Yang P, Wei H L, Huang H L, et al. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near- through far-infrared spectral region[J]. Applied Optics, 2005, 44 (26): 5512-5523.
- [15] Emde C, Buraschnell R, Kylling A, et al. The lib Radtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1)[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2016, 8 (12): 10237-10303.
- [16] 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.
- [17] Pei C X. Quantum communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013: 131-132.
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: 131-132.
- [18] 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.
- [19] Wu T X, Li Y X, Meng W, et al. Research on fidelity enhancement method of quantum teleportation based on partial memory channel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 052701.
武天雄, 李云霞, 蒙文, 等. 基于部分记忆信道的量子隐形传态保真度增强方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 052701.
- [20] 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.
- [21] Liu J, Miao B, Hu Q, et al. Testing quantum nonlocality with two qubit X states [J]. Journal of Quantum Optics, 2020, 26(1): 1-6.
刘晋, 缪波, 胡强, 等. 两比特“X”态的量子非局域关联检验[J]. 量子光学学报, 2020, 26(1): 1-6.
- [22] Liao Z Y, Al-Amri M, Zubairy M S. Protecting quantum entanglement from amplitude damping[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2013, 46(14): 145501.