

# 激光与光电子学进展

## 基于纠缠反馈控制的量子卫星通信性能优化策略

聂敏<sup>1</sup>, 张彦朋<sup>1\*</sup>, 杨光<sup>1,2</sup>, 张美玲<sup>1</sup>, 裴昌幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

<sup>2</sup>西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

<sup>3</sup>西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 量子卫星在自由空间的通信容易受到电离层、空间等离子体和冰晶粒子的干扰, 这些因素会干扰量子卫星的正常通信。为了提高量子卫星链路的抗干扰能力, 首先提出了基于量子纠缠反馈控制(quantum entanglement feedback control, QEFC)的优化策略。QEFC是通过对腔中泄露的光子进行测量, 利用测量得到的信息估计原子的状态, 进而调节控制器, 改变腔中原子的自旋。建立了不同环境因子与保真度、误码率之间的关系, 并对采用 QEFC 前后的系统性能参数进行了比较, 最后进行了性能仿真。结果表明, 在振幅阻尼信道和退极化信道中, QEFC 能够提高自然环境干扰下量子卫星通信系统的保真度; 在空间等离子体环境中, 当等离子体粒子的半径为  $10\ \mu\text{m}$ , 传输距离为 200 km 时, 利用 QEFC 可将误码率从  $13.7 \times 10^{-3}$  降低至  $9.4 \times 10^{-3}$ 。由此可见, QEFC 能够有效提高量子卫星通信系统的链路性能。

**关键词** 量子光学; 量子通信; 纠缠反馈控制; 保真度; 误码率

中图分类号 O431.2 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0527002

### Performance Optimization Strategy for Quantum Satellite Communication Based on Entanglement Feedback Control

Nie Min<sup>1</sup>, Zhang Yanpeng<sup>1\*</sup>, Yang Guang<sup>1,2</sup>, Zhang Meiling<sup>1</sup>, Pei Changxing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;*

<sup>2</sup>*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;*

<sup>3</sup>*State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

**Abstract** Quantum satellite communications in free space are susceptible to interference from ionosphere, space plasma and ice crystal particles. These factors can interfere with the normal communications of quantum satellites. In order to improve the anti-interference ability of quantum satellite links, this paper first proposes an optimization strategy based on quantum entanglement feedback control (QEFC). In QEFC, the leaked photons in the cavity are measured and the information obtained by measure is used to estimate the states of atoms. Further the controller is

收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-08-21; 录用日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划项目(2015KW-013)、陕西省教育厅科研计划项目(16JK1711)

\*E-mail: 1663442560@qq.com

adjusted to change the spin of atoms in the cavity. The relationship of different environmental factors with fidelity and bit error rate is established. Moreover, the system performance parameters before and after the adoption of QEFC are compared. Finally, the performance simulation is performed. The results show that QEFC can improve the fidelity of quantum satellite communication system under natural environmental interference in the amplitude damping channels and depolarization channels. In the space plasma environment, QEFC can reduce the bit error rate from  $13.7 \times 10^{-3}$  to  $9.4 \times 10^{-3}$  when the plasma particle radius is  $10 \mu\text{m}$  and the transmission distance is 200 km. It follows that QEFC can effectively improve the link performance of quantum satellite communication systems.

**Key words** quantum optics; quantum communications; entanglement feedback control; fidelity; bit error rate

**OCIS codes** 270.5565; 060.4510; 060.5565

## 1 引言

量子通信最为直接的方式是通过近地面自由空间信道和光纤进行传输。其中自由空间量子通信不受地理条件和光纤设施的影响,通过量子卫星可实现更远距离乃至覆盖全球的量子通信。因此,量子卫星通信有着很高的研究价值。自由空间量子通信作为构建天地一体网络的重要组成部分,已经成为量子信息领域的研究热点。2016年,我国发射了量子科学实验卫星“墨子号”。“墨子号”已经完成多个星地量子通信实验,包括星地量子隐形传态实验<sup>[1]</sup>、超过 1200 km 的量子纠缠分发实验<sup>[2]</sup>和星地高速量子密钥分发实验<sup>[3]</sup>,实现了基于纠缠的 1000 km 级安全量子加密<sup>[4]</sup>,为构建无线量子通信系统提供了实验依据。目前已建成的光学地面站分布在云南丽江、新疆南山、青海德令哈和西藏阿里,与“墨子号”卫星共同构成了天地一体实验系统。

然而,由于自由空间信道受外界自然环境的影响较大,信道的稳定性和实际信道情况相对复杂。目前光学地面站只是建立在环境较好的地区,并且“墨子号”量子实验卫星只在夜晚大气环境比较理想的条件下进行实验。因此为了建设天地一体量子通信网络,就必须解决这一难题。文献[5]研究了空间等离子体与量子卫星通信性能之间的衰减关系,分析了粒子的消光面积与链路衰减的关系;文献[6]研究了水云粒子与灰霾粒子的不同混合方式和不同比例对量子卫星通信性能的影响;文献[7]研究了冰晶粒子对量子干涉雷达探测性能的影响;文献[8]研究了  $\text{PM}_{2.5}$  对量子卫星通信性能的影响,定量分析了  $\text{PM}_{2.5}$  指数与链路衰减的关系;文献[9]研究了量子移动通信网络小区软切换策略;

文献[10]研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信的影响及沙尘特性与信道容量的关系;文献[11]研究了海洋湍流对单光子捕获概率的影响;文献[12]研究了雾的能见度和传输距离对链路衰减、量子通信信道容量的影响。

以上研究很少为自然环境对自由空间量子通信的影响提供解决方案。因此,本文提出了基于量子纠缠反馈控制(quantum entanglement feedback control, QEFC)模型的量子卫星通信性能优化策略。该策略能够有效提高量子卫星星地链路的抗干扰能力,为天地一体量子通信网络的建立奠定了理论基础。

## 2 QEFC 模型

将一束强激光注入腔中,其与腔中的原子发生相互作用,这时从腔中泄漏出来的光子携带有腔中原子的部分信息。被测信号光  $E_s$  和较强的本地光  $E_L$  分别从光学分束器(BS)的两个通道进入,它们之间有确定的光相位差。在分束器上耦合后,射出的光场为两个相干迭加光场  $E_1$  和  $E_2$ ,然后两个光电探测器分别探测到光场  $E_1$  和  $E_2$ ,产生光电流信号  $I_1$  和  $I_2$ ,获得的信号通过减法器后变为光电流差信号。在本地光  $E_L$  和被测信号光  $E_s$  特定的相位差下,该电流差信号携带了输入信号的相位和振幅信息,这些信息可以用来预测原子的状态。最后控制器通过读取预测的原子状态来调整腔中原子的自旋。QEFC 模型如图 1 所示。

在 QEFC 系统中,因为反馈时间比腔的弛豫时间短,反馈时间可以忽略不记,所以测量的结果会立即反馈给系统,控制器改变腔内原子的状态后,将结果遗忘。

基于平衡零拍测量的随机方程<sup>[13]</sup>为

$$d\rho(t) = \left\{ -i[H, \rho(t)] + a^\dagger \rho(t) a - \frac{1}{2} a^\dagger a \rho(t) - \frac{1}{2} \rho(t) a^\dagger a \right\} dt, \quad (1)$$

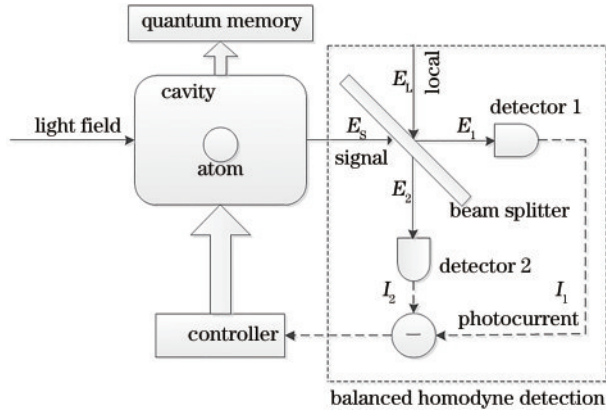


图1 QEFC模型  
Fig. 1 QEFC model

式中: $H$ 为光腔系统的哈密顿量; $a$ 和 $a^\dagger$ 分别为光子的产生与湮灭算符; $\rho(t)$ 为光腔系统的密度矩阵; $t$ 为时间。

$$\frac{d\rho}{dt} = -i[H, \rho(t)] + a^\dagger \rho(t) a - \frac{1}{2} a^\dagger a \rho(t) - \frac{1}{2} \rho(t) a^\dagger a + \kappa [a \rho(t) + \rho(t) a^\dagger] + \frac{1}{2} \eta \kappa^2 \rho(t), \quad (4)$$

式中: $\kappa$ 为一个超算符, $\kappa \rho(t) = i[F, \rho(t)]$ 。确定厄密共轭算符 $F$ ,使得 $d\rho(t) = 0$ ,此时系统是稳态。

假设系统状态与测量算符在自由演化方向保持一致,则QEFC系统主方程为

$$\rho_1 = -i[H_1, \rho] - \frac{J}{2} [q, [q, \rho]], \quad (5)$$

式中: $\rho_1$ 为量子纠缠反馈控制后的密度矩阵; $J$ 为腔模的衰减率; $H_1$ 为该量子系统反馈后的哈密顿量; $q$ 为测量算符。(5)式第一项 $-i[H_1, \rho]$ 为系统本身的自由演化过程,第二项表示测量后产生的影响, $q$ 和 $\rho$ 都是时变算符,且任意 $t$ 时刻 $\rho(t)$ 满足(4)式。

### 3 QEFC系统在自由空间环境信道下的保真度分析

定义自由空间环境中的平均保真度 $F^{[14]}$ 为

$$F(\rho_1, \sigma) = \text{Tr} \sqrt{\frac{1}{\sigma^2} \rho_1 \sigma^2}, \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为量子态与自由空间环境相互作用的终态。

#### 3.1 QEFC系统在振幅阻尼信道下的保真度分析

在振幅阻尼信道中,设自由空间环境中的初始态为 $|\varphi_A\rangle$ ,激发态为 $|1\rangle$ ,量子系统的基态为 $|0\rangle$ 。一个量子比特以概率 $p$ 将激发态 $|1\rangle$ 衰减到基态 $|0\rangle$ ,使自由空间环境态以概率 $p$ 跃迁到 $|\varphi_B\rangle$ 态。量子位与自由空间环境相互作用后的复合系统的么正演化表示为

量子零拍测量的光电流为

$$I(t) = \text{Tr} [(L + L^\dagger) \rho(t)] \Delta t, \quad (2)$$

式中: $\text{Tr}(\cdot)$ 表示取迹;算符 $L$ 为光子的产生算符测量通道,可表示为 $L = \eta \xi^2 S_{1-2}^{\text{ideal}} + 1 - \eta \xi^2$ ,其中 $S$ 为方差, $\xi$ 为模式匹配可见度, $\eta$ 为平衡零拍测量装置的总量子效率(包括探测器效率、光学元件损耗等); $L^\dagger$ 为光子的湮灭算符测量通道; $\Delta t$ 为很小的时间间隔。

在QEFC系统中,控制量是由零拍测量的光电流决定,即

$$\rho_t = -i[F, \rho(t)] I(t), \quad (3)$$

式中: $\rho_t$ 为收到光电流差信号后的密度矩阵; $F$ 为厄密共轭算符。利用(1)~(3)式,消去随机项,得到光腔受反馈控制的主方程为

$$\begin{cases} |0\rangle|\varphi_A\rangle \rightarrow |0\rangle|\varphi_A\rangle \\ |1\rangle|\varphi_A\rangle \rightarrow \sqrt{1-p}|1\rangle|\varphi_A\rangle + \sqrt{p}|0\rangle|\varphi_B\rangle \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $p$ 为受到自由空间环境的影响量子比特发生错误的概率。

利用两个Kraus算子算符<sup>[15]</sup>可以将量子系统的

初始化密度矩阵 $\rho_A = \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}$ 演化为

$$\rho_A \rightarrow \rho'_A = \begin{pmatrix} \rho_{00} + p\rho_{11} & \sqrt{1-p}\rho_{01} \\ \sqrt{1-p}\rho_{10} & (1-p)\rho_{11} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

设信源为 $\{p_i, \rho_i\}$ ,其中 $p_i$ 为信源的量子字符取 $\rho_i$ 时的概率, $\sum p_i = 1$ ,其中 $i$ 为字符编号。若输入字符为 $\rho_0 = |0\rangle\langle 0|, \rho_1 = |1\rangle\langle 1|$ ,则量子系统经过自由空间环境后的状态为

$$\rho_A \rightarrow \sigma = \begin{pmatrix} 1 + pp_1 - p_1 & 0 \\ 0 & p_1 - pp_1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

星地通信时发射的量子态 $|\varphi\rangle$ 的密度矩阵为量子纠缠反馈控制后的密度矩阵 $\rho = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix}$ ,假

设在进行量子测量时,该密度矩阵会以 $|\alpha|^2$ 的概率坍缩到 $|0\rangle$ 态,以 $|\beta|^2$ 的概率坍缩到 $|1\rangle$ 态,其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 为复数,称为量子态的概率幅,且 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。则对于振幅阻尼信道,其平均保真度可表示为

$$F(\rho_1, \sigma) = \text{Tr} \sqrt{\begin{pmatrix} 1+pp_1-p_1 & 0 \\ 0 & p_1-pp_1 \end{pmatrix}^{\frac{1}{2}} \times \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1+pp_1-p_1 & 0 \\ 0 & p_1-pp_1 \end{pmatrix}^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

### 3.2 QEFC 系统在退极化信道下的保真度分析

设量子态的一般态为  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , 自由空间环

境量子态为  $|e\rangle$ , 则量子态与自由空间环境的联合演化可表示为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow \alpha(|e_0\rangle|0\rangle + |e'_0\rangle|1\rangle) + \beta(|e_1\rangle|0\rangle + |e'_1\rangle|1\rangle), \quad (11)$$

式中:  $|e_0\rangle, |e'_0\rangle$  和  $|e_1\rangle, |e'_1\rangle$  为演化态中量子态的对偶量子态;  $|e_0\rangle|0\rangle + |e'_0\rangle|1\rangle$  和  $|e_1\rangle|0\rangle + |e'_1\rangle|1\rangle$  为纠缠态。

一个量子位经过退极化信道后一般演变为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow (|e_+\rangle I + |e_-\rangle Z + |e'_+\rangle X + |e'_-\rangle Y) \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle), \quad (12)$$

式中:  $I, X, Y$  和  $Z$  为力学量算子;  $|e_+\rangle, |e_-\rangle, |e'_+\rangle, |e'_-\rangle$  为四种特殊的自由空间环境量子态;  $\otimes$  表示张量积。规定  $|e_+\rangle = |e_1\rangle, |e'_+\rangle = |e_x\rangle, |e'_-\rangle = |e_y\rangle, |e_-\rangle = |e_z\rangle$ , 其

中,  $|e_1\rangle$  为自由空间环境的初态,  $|e_x\rangle, |e_y\rangle, |e_z\rangle$  为三种等概率出现的自由空间环境量子态。那么量子位和自由空间环境构成的复合系统的么正演化<sup>[16]</sup>表示为

$$|\varphi\rangle|e_1\rangle \rightarrow \sqrt{1-p'}I|\varphi\rangle \otimes |e_1\rangle + \sqrt{\frac{p'}{3}}X|\varphi\rangle \otimes |e_x\rangle + \sqrt{\frac{p'}{3}}Y|\varphi\rangle \otimes |e_y\rangle + \sqrt{\frac{p'}{3}}Z|\varphi\rangle \otimes |e_z\rangle, \quad (13)$$

式中:  $|\varphi\rangle$  为量子位;  $p'$  为量子位的退极化概率。

四个 Kraus 算子算符<sup>[17]</sup>为

$$\begin{cases} K_0 = \sqrt{1-p'}I \\ K_1 = \sqrt{\frac{p'}{3}}X \\ K_2 = \sqrt{\frac{p'}{3}}Y \\ K_3 = \sqrt{\frac{p'}{3}}Z \end{cases} \quad (14)$$

假设量子系统的初始化密度矩阵  $\rho_A =$

$\begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}$  经过退极化信道后演化为

$$\rho_A \rightarrow \rho'_A = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{2}{3}p\right)\rho_{00} & \left(1 - \frac{2}{3}p\right)\rho_{01} \\ \left(1 - \frac{2}{3}p\right)\rho_{10} & \left(1 - \frac{2}{3}p\right)\rho_{11} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

则量子系统经过自由空间环境后的状态为

$$\rho_A \rightarrow \sigma = \begin{pmatrix} \frac{p}{2} + (1-p)p_1 & 0 \\ 0 & \frac{p}{2} + (1-p)(1-p_1) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

量子纠缠反馈控制后的密度矩阵为  $\rho = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix}$ , 对于退极化信道, 其平均保真度可表示为

$$F(\rho_1, \sigma) = \text{Tr} \left[ \sqrt{\begin{pmatrix} \frac{p}{2} + (1-p)p_1 & 0 \\ 0 & \frac{p}{2} + (1-p)(1-p_1) \end{pmatrix}^{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{p}{2} + (1-p)p_1 & 0 \\ 0 & \frac{p}{2} + (1-p)(1-p_1) \end{pmatrix}^{\frac{1}{2}}} \right]. \quad (17)$$

### 3.3 QEFC 系统在相位阻尼信道下的保真度分析

设量子位态的一般态为  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , 自由空间环境量子态为  $|e\rangle$ , 设量子位与自由空间环境等效量

子态发生完全弹性散射的概率为  $p_2$ , 则量子态与自由空间环境的联合演化可表示为

$$|e\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow \sqrt{1-p_2}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|e\rangle I + \sqrt{p_2}(\alpha|0\rangle)|e\rangle X + \beta|1\rangle|e\rangle Y. \quad (18)$$

量子系统的初始化密度矩阵  $\rho_\Lambda = \begin{pmatrix} \rho_{00} & \rho_{01} \\ \rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}$  经过相位阻尼信道后演化为

$$\rho_\Lambda \rightarrow \sigma = \begin{bmatrix} \rho_{00} & (1-p_2)\rho_{01} \\ (1-p_2)\rho_{10} & \rho_{11} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

量子纠缠反馈控制后的密度矩阵为  $\rho = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix}$ , 对于相位阻尼信道, 其平均保真度可表示为

$$F(\rho_\Lambda, \sigma) = \text{Tr} \sqrt{\begin{pmatrix} \rho_{00} & (1-p_2)\rho_{01} \\ (1-p_2)\rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta \\ \alpha\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{00} & (1-p_2)\rho_{01} \\ (1-p_2)\rho_{10} & \rho_{11} \end{pmatrix}}. \quad (20)$$

#### 4 QEFC 系统在空间等离子体环境下的误码率分析

假设发射的弱相干态光源是相位随机的<sup>[18]</sup>, 光场的光子数分布满足 Poisson 分布, 则从地面发射站发射的量子态可以写为

$$\rho = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda) |k\rangle\langle k|, \quad (21)$$

式中: 当  $k=0$  时, 量子态不含有光子, 称为真空态; 当  $k=1$  时, 量子态只含有一个光子, 称为单光子态; 当  $k \geq 2$  时, 量子态包含两个或两个以上的光子, 称为多光子态;  $\lambda$  为平均光子数;  $|k\rangle$  为空间等离子体环境中湮没算子的本征态;  $\langle k|$  为量子系统环境中湮没算子的本征态。

通常取  $\lambda=0.1, k \leq 2$ <sup>[17]</sup>。当卫星发射一个脉冲时, 量子误码率可表示为

$$E_Q = \sum_{k=0}^2 \delta_k N_k \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda), \quad (22)$$

式中:  $N_k$  为发射  $k$  光子数态时的计数率,  $N_k = \eta_k + N_0 - N_0 \eta_k$ , 其中  $\eta_k$  为光子脉冲的通过率,  $\eta_k = 1 - (1 - \eta_d)^k$ ,  $\eta_d$  为自由空间信道中的传输率,  $N_0$  为自然环境中的噪声引起的暗计数;  $\delta_k$  为发射  $k$  光子数态时的误码率,  $\delta_k = [\delta_0 N_0 + \delta_d (1 - \eta_k)] / N_k$ ,  $\delta_0$  为自然环境中的噪声引起的暗计数中的误探测概率,  $\delta_d$  为探测器自身的系统错误概率。

化简得总误码率公式为

$$E_Q = \delta_0 N_0 + \sum_{k=0}^2 [\delta_0 N_0 + \delta_d (1 - \eta_d)^k] \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda). \quad (23)$$

空间等离子体粒子半径为  $0 \sim 10 \mu\text{m}$ , 总的消光截面表示<sup>[19]</sup>为

$$\alpha = \int_0^{10} \frac{n_d}{\sqrt{2} \pi r \ln \tau} \exp \left[ -\frac{\left( \ln \frac{r}{r_{\text{ave}}} \right)^2}{2(\ln \tau)^2} \right] \sigma_{\text{tot}} dr, \quad (24)$$

式中:  $r$  为空间等离子体粒子的半径;  $n_d$  为空间等离子体的浓度;  $r_{\text{ave}}$  为几何平均半径;  $\sigma_{\text{tot}}$  为衰减截面;  $\tau$  为几何平均偏差。

当量子加密卫星在星地之间传输时, 等离子体导致的链路衰减为

$$A_{\text{att}} = 10\alpha \cdot \text{lb} e \cdot d, \quad (25)$$

式中:  $A_{\text{att}}$  为链路衰减;  $e$  为自然底数;  $d$  为星地间的传输距离。

在空间等离子体信道中, 光子的传输效率  $\eta_d$  为

$$\eta_d = 10^{-A_{\text{att}}/100}. \quad (26)$$

#### 5 仿真结果与分析

根据(5)式和(10)式, 分别仿真了在振幅阻尼信道中, 采用纠缠反馈控制系统前后的平均保真度, 结果如图2所示。从图2看出, 随着  $|\alpha|^2$  值的增大, 保真度增大。在采用纠缠反馈控制系统后, 信道的平均保真度有了明显的提升。当  $|\alpha|^2 = 0.2$  时, 保真度由 0.393 提升到了 0.578。因此 QEFC 能够提高系统的



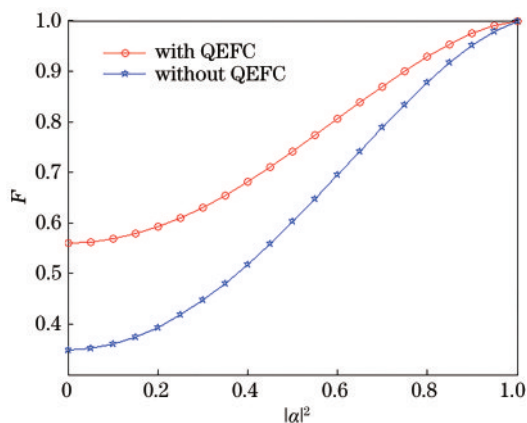


图 2 采用 QEFC 前后系统的保真度与  $|\alpha|^2$  的关系  
Fig. 2 Relationship between system's fidelity and  $|\alpha|^2$  with/without QEFC

保真度,这对提高系统的抗干扰性有很大的意义。

根据(5)式和(17)式,分别仿真了在退极化信道中,采用纠缠反馈控制系统前后保真度与信源字符概率的关系,结果如图3所示。从图3可以看出,在采用纠缠反馈控制系统后,信道的平均保真度有了明显的提升。当  $p_1 = 0.5$  时,信道保真度由 0.712 提升到了 0.909。可见采用 QEFC 能够提高系统的保真度。在进行量子加密通信时,为了得到更好的通信效果,在采用 QEFC 的同时,可以通过调整信源量子字符的状态得到最大保真度。

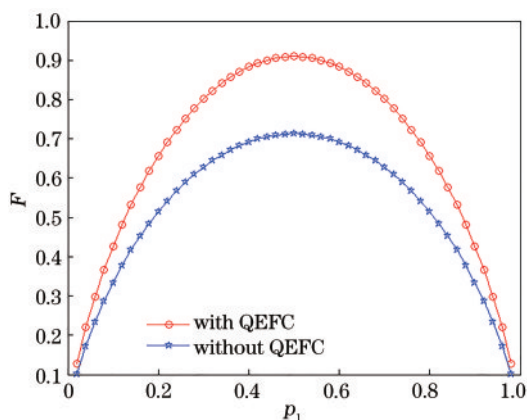


图 3 采用 QEFC 前后系统的保真度与字符概率  $p_1$  的关系  
Fig. 3 Relationship between system's fidelity and  $p_1$  with/without QEFC

根据(5)式和(20)式,分别仿真了在相位阻尼信道中,采用纠缠反馈控制系统前后保真度与  $p$  的关系,结果如图4所示。从图4可以看出,在采用纠缠反馈控制系统后,信道的平均保真度有了明显的提升。当  $p = 0.4$  时,信道保真度由 0.568 提升到了

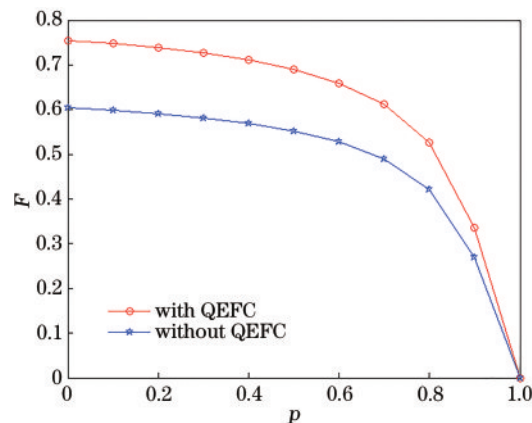


图 4 采用 QEFC 前后系统的保真度与  $p$  的关系  
Fig. 4 Relationship between system's fidelity and  $p$  with/without QEFC

0.711。可见在进行量子通信时,采用 QEFC 可以很好提高系统传输的有效性。

表1为信道误码率参数设置<sup>[20]</sup>。取空间等离子体浓度  $n_d = 5 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ,根据(5)式和(23)~(26)式,分别仿真了在采用纠缠反馈控制系统前后空间等离子体环境中的信道误码率随星地距离和粒子半径的变化,结果如图5所示,其中  $r_d$  为空间等离子体粒子的半径。

表 1 信道误码率参数设置

$\delta_d$	$N_0$	$\delta_0$
3.2%	$1.7 \times 10^{-6}$	0.5

从图5可以看出,当传输距离为 100 km,粒子半径从  $2 \mu\text{m}$  增加  $8 \mu\text{m}$  时,未采用 QEFC 系统的误码率从  $9.24 \times 10^{-3}$  增加到  $10.23 \times 10^{-3}$ ,而采用 QEFC 系统的误码率从  $6.37 \times 10^{-3}$  增加到  $7.23 \times 10^{-3}$ 。因此,当传输距离一定时,随着粒子半径的增大,采用 QEFC 系统的误码率比未采用 QEFC 系统的误码率低很多。当粒子半径为  $5 \mu\text{m}$ ,传输距离从 50 km 增加 150 km 时,未采用 QEFC 系统的误码率从  $6.87 \times 10^{-3}$  增加到  $11.84 \times 10^{-3}$ ,而采用 QEFC 系统的误码率从  $4.73 \times 10^{-3}$  增加到  $8.20 \times 10^{-3}$ 。因此,当粒子半径一定时,随着传输距离的增大,采用 QEFC 系统的误码率比未采用 QEFC 系统的误码率低很多。由此可以看出,在进行量子通信时,采用 QEFC 系统可以很好地提高系统传输的有效性。

## 6 结 论

研究了基于纠缠反馈控制的量子卫星通信性能优化策略,建立了纠缠反馈控制模型,并对其进行了

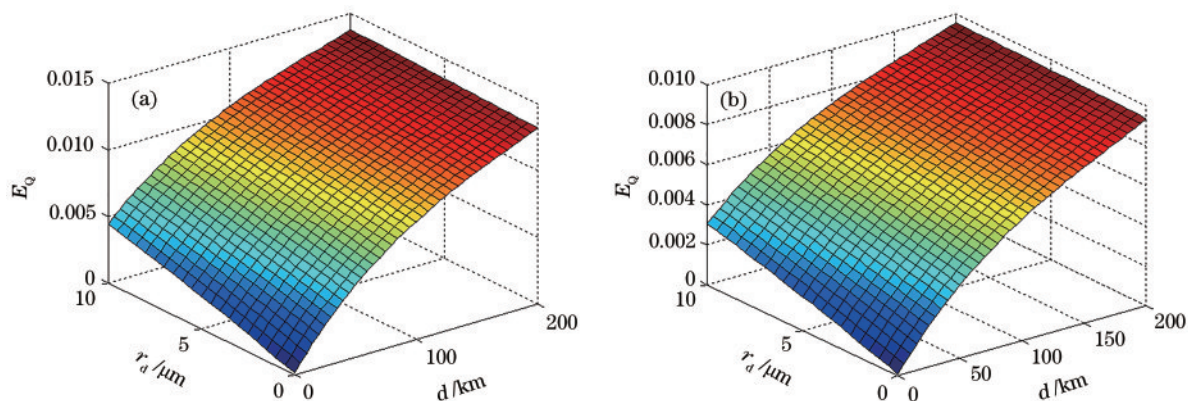


图 5 量子误码率随星地距离和粒子半径的变化。(a)未采用QEFC;(b)采用QEFC

Fig. 5 Quantum bit error rate versus satellite-ground distance and particle radius. (a) Without QEFC; (b) with QEFC

定量分析。结果表明,在自然环境干扰下,采用量子纠缠反馈控制,能够有效提升量子信号在振幅阻尼信道、退极化信道和相位阻尼信道中的保真度,同时还能降低量子信号通过空间等离子体环境时的误码率。该策略改变了纠缠对之间的纠缠度,能够有效提升量子加密卫星星地链路的抗干扰能力和星地间的传输效率。由此可见, QEFC能够在很大程度上增强量子卫星通信网络的链路性能,为未来量子天地一体通信网络的发展提供重要的参考。

### 参 考 文 献

- [1] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 70-73.
- [2] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140-1144.
- [3] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution [J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 43-47.
- [4] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1120 kilometres [J]. *Nature*, 2020, 582(7813): 501-505.
- [5] Tang S R, Nie M, Yang G, et al. Influence of space dusty plasmas on the performance of quantum satellite communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1206002.  
唐守荣, 聂敏, 杨光, 等. 空间尘埃等离子体对量子卫星通信性能的影响 [J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 1206002.
- [6] Nie M, Chang L, Yang G, et al. Influence of different mixing patterns of haze particles and water cloud particles on the performance of quantum satellite communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0701002.  
聂敏, 常乐, 杨光, 等. 灰霾粒子与水云粒子不同混合方式对量子卫星通信性能影响 [J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0701002.
- [7] Nie M, Zhang Y X, Yang G, et al. Influences of ice crystal particles on the detection performance of quantum interference radar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130101.  
聂敏, 张怡心, 杨光, 等. 冰晶粒子对量子干涉雷达探测性能的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130101.
- [8] 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.
- [9] Nie M, Kou W X, Wei R Y, et al. Cell soft handover strategy for 6G network of quantum mobile communication based on optimal entanglement degree [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 152701.  
聂敏, 寇文翔, 卫容宇, 等. 基于最优纠缠度的量子移动通信 6G 网络小区软切换策略 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 152701.
- [10] Nie M, Shang P G, Yang G, et al. Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240303.  
聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真 [J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240303.

- [11] Nie M, Zhao Y, Yang G, et al. Influence of the oceanic turbulence on performance of single photon acquisition probability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 242702.  
聂敏, 赵元, 杨光, 等. 海洋湍流对单光子捕获概率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 242702.
- [12] 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.  
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.
- [13] Wei J H. On the creation of quantum entanglement via quantum measurement-based feedback control and the application of quantum entanglement [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016: 46-52.  
魏家华. 基于量子测量反馈控制的纠缠态制备与纠缠态应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016: 46-52.
- [14] Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang. *Quantum computation and quantum information (II)* [M]. Zheng D Z, Zhao Q C, Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:56.  
迈克尔·A·尼尔森, 艾萨克·L·庄. 量子计算和量子信息(II)[M]. 郑大钟, 赵千川, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005: 56.
- [15] Zhang Y D. *Principles of quantum information physics*[M]. Beijing: Science Press, 2005:125-151.  
张永德. 量子信息物理原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 125-151.
- [16] Yin H, Han Y. *Principles and techniques of quantum communication* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 76-130.  
尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 76-130.
- [17] Zhang Y D. *Quantum mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2010:343-346.  
张永德. 量子力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 343-346.
- [18] Zhou Y Y, Zhou X J. Nonorthogonal passive decoy-state quantum key distribution with a weak coherent state source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 100301.  
周媛媛, 周学军. 基于弱相干态光源的非正交编码被动诱骗态量子密钥分配[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 100301.
- [19] von Savigny C, Petelina S V, Karlsson B, et al. Vertical variation of NLC particle sizes retrieved from Odin/OSIRIS limb scattering observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(7): L07806.
- [20] Hu H P, Wang J D, Huang Y X, et al. Nonorthogonal decoy-state quantum key distribution based on conditionally prepared down-conversion source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 287-292.  
胡华鹏, 王金东, 黄宇娴, 等. 基于条件参量下转换光子对的非正交编码诱骗态量子密钥分发[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 287-292.