

无噪线性放大的连续变量量子隐形传态

文镇南 易有根 徐效文 郭迎

Continuous variable quantum teleportation with noiseless linear amplifier

Wen Zhen-Nan Yi You-Gen Xu Xiao-Wen Guo Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 130307 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212341

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212341>

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

基于量子催化的离散调制连续变量量子密钥分发

Discrete modulation continuous-variable quantum key distribution based on quantum catalysis

物理学报. 2020, 69(6): 060301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191689>

基于峰值补偿的连续变量量子密钥分发方案

Continuous-variable quantum key distribution based on peak-compensation

物理学报. 2021, 70(11): 110302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202073>

微波连续变量极化纠缠

Continuous variable polarization entanglement in microwave domain

物理学报. 2019, 68(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181911>

基于部分测量增强量子隐形传态过程的量子Fisher信息

Enhancement of quantum Fisher information of quantum teleportation by optimizing partial measurements

物理学报. 2018, 67(14): 140304 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180330>

基于光前置放大器的量子密钥分发融合经典通信方案

Optical preamplifier based simultaneous quantum key distribution and classical communication scheme

物理学报. 2021, 70(2): 020301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200855>

退相位环境下Werner态在石墨烯基量子通道中的隐形传输

Teleportation of Werner state via graphene-based quantum channels under dephasing environment

物理学报. 2022, 71(7): 070304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211881>

无噪线性放大的连续变量量子隐形传态*

文镇南¹⁾ 易有根¹⁾ 徐效文^{1)†} 郭迎²⁾

1) (中南大学物理与电子学院, 长沙 410083)

2) (中南大学自动化学院, 长沙 410083)

(2021 年 12 月 18 日收到; 2022 年 2 月 19 日收到修改稿)

连续变量量子隐形传态在实际的量子通信中起着至关重要的作用. 然而, 实际环境的噪声与损耗会导致量子纠缠的退化, 极大地影响系统的传输性能, 尤其是降低系统的传输距离, 阻碍其实际应用. 本文提出了无噪线性放大的连续变量量子隐形传态方案, 利用无噪线性放大器对退化的纠缠源进行放大, 从而补偿光纤损耗信道对纠缠源的衰减影响, 提升系统的性能. 本文详细分析了不同损耗信道和纠缠源情况下, 无噪线性放大器的增益系数选取范围以及不同增益对方案性能的影响. 仿真结果表明, 本文提出的方案相比于原方案, 在保真度和传输距离方面都有较大的提升. 该研究结果为长距离连续变量量子隐形传态的实际应用提供了一种切实有效的方法.

关键词: 连续变量, 量子隐形传态, 损耗信道, 无噪线性放大器**PACS:** 03.67.Hk, 03.67.Dd**DOI:** 10.7498/aps.71.20212341

1 引言

量子隐形传态是量子通信的一个重要部分, 它应用量子力学的纠缠特性, 能在不传输物理载体本身的情况下, 将一个未知的量子态传送到遥远的地方, 实现量子态的空间传输. 近年来, 量子隐形传态技术取得了很大的进展, 主要可以分为离散变量量子隐形传态^[1–3](discrete-variable quantum teleportation, DVQT) 和连续变量量子隐形传态^[4–6](continuous-variable quantum teleportation, CVQT) 两大类. 1993 年, Bennett 等^[1]开创性地提出了 DVQT 协议, 打开了量子隐形传态研究的大门, 也使得量子隐形传态成为了量子信息科学中最有趣、最具潜力的领域之一. 之后, 大量学者对 DVQT 进行了相关的理论分析和实验研究, 在光纤、自由空间、星地链路等传输环境下取得了重大突破^[7–9]. 虽然

光量子比特已被用做实现长距离量子隐形传态的重要载体, 但是精确的单光子源制备非常困难, 而且单光子探测器造价高昂, 目前只适用于科学研究领域, 不能实现大面积的商用. 幸运的是, 在 DVQT 协议提出后不久, 量子隐形传态就被拓展到了连续变量系统中^[4,10,11], 并且得到了多位学者的实验验证^[12–14]. 不同于 DVQT, 在 CVQT 协议中, 量子信号制备过程简单, 相干态、压缩态等量子态均可以作为信息的载体, CVQT 所使用的平衡零差探测技术是经典光通信中常用的技术, 探测技术成熟, 探测效率较高. 此外, CVQT 与经典光通信系统有更好的兼容性, 在大规模商用方面更具优势.

在 CVQT 中, 最著名的协议是 Braunstein 和 Kimble^[4]在 1998 年提出的, 被称为 BK 协议. 发送方 (Alice) 利用共享的双模压缩真空态作为量子信道, 将未知的量子态转移到接收方 (Bob), 并通过经典通信将测量结果发送到 Bob 端. 当量子信道

* 国家自然科学基金 (批准号: 61871407) 和广西无线宽带通信与信号处理重点实验室开放基金 (批准号: GXKL06200208) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuxiaowen@csu.edu.cn

是一个理想的无限压缩态时, Bob 能得到由 Alice 传送给他的量子态的精确副本. 然而, 这是非常不现实的, 因为一方面, 理想的无限压缩状态在物理上是不可实现的; 另一方面, 在实际情况下, 量子系统将不可避免地与周围环境相互作用, 这些相互作用通常会导致量子相干性和纠缠性的退化, 从而降低 CVQT 协议的性能. 因此, 在有限压缩、损耗信道等现实条件下的 CVQT 是值得研究的. 1998 年, Furusawa 等^[12]实验完成了有限压缩条件下光学相干态的 CVQT, 保真度达到 0.58 ± 0.02 , 首次实现无条件量子隐形传态. 2005 年, Takei 等^[15,16]实验验证了压缩态的 CVQT, 并且实现了高保真度的相干态 CVQT, 保真度达到 0.70 ± 0.02 . 为进一步提升协议性能, Dell'Anno 等^[17,18]在 2007 年提出利用非高斯纠缠源实现 CVQT, 之后又对该方案的非理想情况进行了全面研究. 针对实际环境对 CVQT 的影响问题, He 等^[19]定量地研究了不同环境下连续变量纠缠变化对量子隐形传态的影响, Hu 等^[20]分析了在现实环境中通过参数调整获得 CVQT 的最佳保真度的方法. 2018 年, Huo 等^[6]首次实验完成了光纤信道的确定性 CVQT, 实际保真度达到 0.62 ± 0.03 . 之后, 有学者对大气信道和星地链路的 CVQT 进行了研究^[21–23]. 除了传统的 CVQT 方案研究, 还有学者从其他角度提出新的 CVQT 方案. 2020 年, Liu 等^[24]将轨道角动量 (OAM) 应用到 CVQT 中, 实现了多光模的并行量子隐形传态. Chen 和 Ou^[25]提出利用参数放大器替代分束器来完成贝尔测量, 可以有效地补偿探测损耗, 使得在探测损耗较大时仍然保持较高的保真度. 2021 年, Asjad 等^[26]提出一种利用光-微波等离子体复合石墨烯波导系统制备连续变量纠缠对的方法, 并将制备的纠缠对用于建立 CVQT 的量子信道, 可以在一定程度提高隐形传态的保真度. 同年, Fedorov 等^[27]在宏观距离上实验实现了相干微波态的量子隐形传态, 保真度达到 0.689 ± 0.004 , 为无条件安全的微波量子通信开辟了道路. 2022 年, Zhao 等^[28]利用 1550 nm 的 EPR 纠缠源实验实现了单模光纤中的实时确定性量子隐形传态, 为建立基于光纤的城域量子网络提供了一种新的方案. 然而, 这些 CVQT 实验都是在实验室中进行的, 传输距离非常短. 大多学者所提出的 CVQT 方案都聚焦于保真度的性能分析与提升, 而很少考虑实际的传输距离. 目前, 传输距离较短是阻碍 CVQT

的实际应用的重要原因, 因此, 如何提升其传输距离是亟待解决的问题.

为了提升实际环境下 CVQT 方案的传输距离, 本文提出基于无噪线性放大器 (noiseless linear amplifier, NLA) 的 CVQT 方案, 即在原始 CVQT 方案中插入 NLA 对损耗纠缠态进行放大. 一方面, NLA 的加入能够补偿信道损耗的衰减影响, 相当于提升了信道的透过率; 另一方面, NLA 对信道的过噪声影响极小, 增加的过噪声对系统性能的影响可以忽略不计. 本文对所提方案进行了数值仿真, 仿真结果表明本文所提方案可以有效提升 CVQT 系统的传输距离, 让 CVQT 方案具有更广的应用范围. 本文具体安排如下: 第 2 节详细阐述 CVQT 协议和 NLA, 包括在光纤信道中基于 BK 协议的 CVQT 方案, 以及加入 NLA 之后量子态和信道参数的变化; 第 3 节给出了本文方案的性能分析, 考虑了不同损耗信道和纠缠源的方案性能; 第 4 节对全文进行总结.

2 CVQT 协议与无噪线性放大器

2.1 基于 BK 协议的 CVQT 方案

图 1 为纠缠源置于通信双方之间的 CVQT 方案图, 方案中通信双方分别是 Alice 和 Bob, 未知量子态通过量子信道从 Alice 端传送到 Bob 端的过程即为量子隐形传态. 在本方案中被用于建立 Alice 和 Bob 之间量子信道的纠缠源为双模压缩真空态, 也被称为 EPR 态. EPR 态由第三方 Charlie 制备, 包含 A_0 和 B_0 两个模, 分别经过透过率为 T , 过噪声为 ε 的损耗光纤信道发送至通信双方. 由于光纤的固有传输损耗, 光纤的透过率随传输距离的增加而减小, 表示为 $T = 10^{-\kappa D/10}$, 其中, $\kappa = 0.2$ dB/km 为光纤损耗系数, D 为传输距离. 在 Alice 与 Bob 接收到 EPR 态的模后, 双方对接收模进行 NLA 放大, 放大增益为 g , 分别得到模 A_1 和 B_1 . 在发送端, Alice 通过 50:50 的分束器将未知输入态 ρ_m 与 A_1 模耦合, 再利用两套平衡零差探测器对分束器的两个输出模进行测量, 得到关于正交振幅分量 x 和正交相位分量 p 的测量结果 (X_M, P_M) ^[14]. 由于 EPR 态的纠缠特性, Alice 的测量使得输入态被投影到 B_1 模, 且二者之间只存在取决于测量结果的相空间位移偏差. 因此, Alice 将测量结果通过经典信道发送至 Bob, Bob 根据测量结果, 利用一

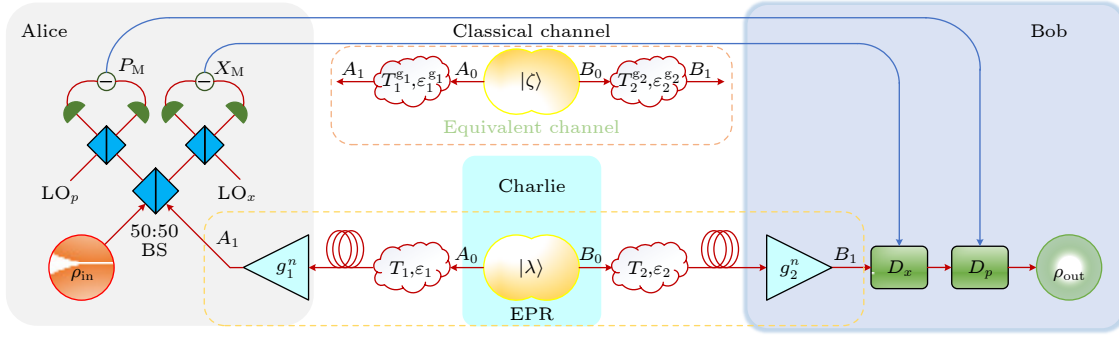


图 1 无噪线性放大 CVQT 方案示意图. 纠缠源 EPR 态由第三方 Charlie 制备, 模 A_0 和 B_0 分别经过光纤损耗信道传输至 Alice 和 Bob 端, Alice 和 Bob 利用无噪线性放大器对接收模进行放大. LO, 本振光; BS, 分束器; g , 无噪线性放大器增益系数

Fig. 1. Schematic of the NLA-based CVQT scheme. The entangled source EPR state is prepared by the third party Charlie. The modes A_0 and B_0 are transmitted to Alice and Bob through the fiber lossy channel. At the receiver, Alice and Bob use noiseless linear amplifiers for performance improvement. LO, local oscillator; BS, beam splitter; g , gain of NLA.

个振幅调制器和一个相位调制器对 B_1 模进行位移操作 (D_X, D_P), 最终得到输入态的副本 ρ_{out} . 至此, 输入态在自身未被发送的情况下, 完成了量子态从 Alice 端到 Bob 端的转移, 实现了量子隐形传态过程. 需要注意的是, 这一过程并非是对输入态 ρ_{in} 的克隆, 因为 Alice 对 ρ_{in} 进行的 Bell 测量会破坏 ρ_{in} 本身, 因此该过程不违背不可克隆定理, 而且该过程需要经典通信的参与, 并非是超光速通信, 不违背相对论原理.

众所周知, 评估隐形传态方案性能的重要指标是保真度^[29], 它表征了输入态 ρ_{in} 与输出态 ρ_{out} 之间的接近程度, 定义为

$$\mathcal{F} = \left[\text{tr} \sqrt{\sqrt{\rho_{in}} \rho_{out} \sqrt{\rho_{in}}} \right]^2, \quad (1)$$

其中 tr 为求迹算符. 当输入态为纯态时, 保真度可以由输入态与输出态的特征函数的叠加积分计算得到, 即 (1) 式可以写为

$$\mathcal{F} = \frac{1}{\pi} \int \chi_{in}(\xi) \chi_{out}^*(\xi) d^2\xi, \quad (2)$$

其中 $\chi_{in}(\xi)$ 和 $\chi_{out}(\xi)$ 分别是输入态和输出态的特征函数, 在本文的方案中, 考虑相干态作为输入态. 由于隐形传态在位移变换下是不变的, 也就是说具有相同协方差矩阵但不同相干分量的所有状态都以相同的保真度进行隐形传态^[30], 因此, 选择相干振幅为零的真空态作为计算的输入态, 特征函数为

$$\chi_{in}(\xi) = e^{-\frac{1}{2}|\xi|^2}. \quad (3)$$

输出态的特征函数可以通过输入态特征函数和纠缠源特征函数计算得到, 即 $\chi_{out}(\xi) = \chi_{in}(\xi) \chi_{EPR}(\xi^*, \xi)$. EPR 态的特征函数为

$$\chi_{EPR}(\alpha, \beta) = e^{-\frac{V}{2}(|\alpha|^2 + |\beta|^2) + \frac{\sqrt{V^2 - 1}}{2}(\alpha\beta + \alpha^*\beta^*)}, \quad (4)$$

其中 α 和 β 均为复变量; V 为 EPR 态的调制方差, 用纠缠源固有参数 λ 表示为 $V = (1 + \lambda^2) / (1 - \lambda^2)$. 当 EPR 态经过损耗信道后, 特征函数改变为

$$\chi_{EPR}(\alpha, \beta) = e^{-\frac{1}{2}(a|\alpha|^2 + b|\beta|^2) + \frac{c}{2}(\alpha\beta + \alpha^*\beta^*)}, \quad (5)$$

其中 $a = T_1(V + (1 - T_1)/T_1 + \varepsilon_1)$, $b = T_2(V + (1 - T_2)/T_2 + \varepsilon_2)$ 以及 $c = \sqrt{T_1 T_2 (V^2 - 1)}$. 联立 (2) 式、(4) 式和 (5) 式, 可以计算得到损耗环境下 CVQT 保真度为

$$\mathcal{F} = \frac{2}{2 + a + b - 2c}. \quad (6)$$

从 (6) 式可以看到, CVQT 系统保真度主要受光纤信道透过率 T 、过噪声 ε 以及纠缠源固有参数 λ 影响.

2.2 无噪线性放大器

系统保真度受光纤透过率影响, 随着传输距离的增加, 光纤损耗增大, 透过率减小, 这是降低系统性能的主要因素. 在量子密码领域, 针对信道损耗的问题, 已有一些工作利用 NLA 来补偿损耗, 提升协议的最大传输距离^[31,32]. 因此, 考虑在 CVQT 中引入 NLA 来放大损耗的纠缠态以削减信道损耗带来的衰减影响, 从而提高系统的性能.

在图 1 所示纠缠源置于通信双方中间的 CVQT 方案中, 收发两端都插入了一个 NLA, 由于 NLA 的输出保持在高斯范围内, 可以对经过损耗信道的 EPR 态进行参数等效^[33], 即 EPR 态 $|\lambda\rangle$ 经过透过率为 T_i , 过噪声为 ε_i 的损耗信道后再经增益为 g_i 的 NLA 放大, 等效于 EPR 态 $|\zeta\rangle$ 经过透过率为 $T_i^{g_i}$, 过噪声为 $\varepsilon_i^{g_i}$ 的损耗信道, 其中 $i \in \{1, 2\}$. 参数关系式为

$$\zeta = \lambda \sqrt{\frac{[(g_1^2 - 1)(\varepsilon_1 - 2)T_1 - 2] \cdot [(g_2^2 - 1)(\varepsilon_2 - 2)T_2 - 2]}{[(g_1^2 - 1)\varepsilon_1 T_1 - 2] \cdot [(g_2^2 - 1)\varepsilon_2 T_2 - 2]}},$$

$$T_i^{g_i} = \frac{4T_i g_i^2}{T_i (g_i^2 - 1) \cdot [(g_i^2 - 1)(\varepsilon_i - 2)\varepsilon_i T_i - 4(\varepsilon_i - 1)] + 4}, \quad \varepsilon_i^{g_i} = \varepsilon_i - \frac{1}{2} (g_i^2 - 1) (\varepsilon_i - 2) \varepsilon_i T_i. \quad (7)$$

基于各参数的物理意义, 等效参数需要满足以下条件:

$$0 \leq \zeta < 1, \quad 0 \leq T_i^{g_i} \leq 1, \quad \varepsilon_i^{g_i} \geq 0. \quad (8)$$

根据 (7) 式可以计算得出, 要满足上述条件, EPR 态参数 λ 与 NLA 的增益系数 g 需满足 (9) 式和 (10) 式且过噪声 $\varepsilon < 2$.

$$0 \leq \lambda < \sqrt{\frac{[(g_1^2 - 1)\varepsilon_1 T_1 - 2] \cdot [(g_2^2 - 1)\varepsilon_2 T_2 - 2]}{[(g_1^2 - 1)(\varepsilon_1 - 2)T_1 - 2] \cdot [(g_2^2 - 1)(\varepsilon_2 - 2)T_2 - 2]}}, \quad (9)$$

$$g_{\max, i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_i [T_i (\varepsilon_i - 2) + 2] - 2\sqrt{\varepsilon_i [T_i (\varepsilon_i - 2) + 2]}}{T_i \varepsilon_i (\varepsilon_i - 2)}}. \quad (10)$$

经过 NLA 放大后, EPR 态对应特征函数为

$$\chi_{\text{EPR}}^g(\alpha, \beta) = e^{-\frac{1}{2}(a_1|\alpha|^2 + b_1|\beta|^2) + \frac{c_1}{2}(\alpha\beta + \alpha^*\beta^*)}, \quad (11)$$

其中 $a_1 = T_1^{g_1} [V_g + (1 - T_1^{g_1})/T_1^{g_1} + \varepsilon_1^{g_1}]$, $b_1 = T_2^{g_2} [V_g + (1 - T_2^{g_2})/T_2^{g_2} + \varepsilon_2^{g_2}]$, $c_1 = \sqrt{T_1^{g_1} T_2^{g_2} (V_g^2 - 1)}$ 以及 $V_g = (1 + \zeta^2)/(1 - \zeta^2)$.

3 性能分析与讨论

本节从保真度和传输距离的角度分析所提出方案的性能提升, 根据信道损耗的不同, 主要分两种情况进行讨论. 第一种是对称损耗信道情况, 如图 1 所示, 在这个方案中纠缠源置于 Alice 和 Bob 之间, 需要第三方 Charlie 参与纠缠源的制备与发送, 虽然增加系统复杂度, 但有利于提升系统最大传输距离. 有研究证明关联的损耗信道特性有利于保持高斯纠缠特性^[34], 因此, 本节将讨论对称损耗信道情况, 即 $T_1 = T_2 = T$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$. 第二种是单边损耗信道情况, 可以视为第一种情况的简化, 在这种情况下, 无需第三方 Charlie 介入, EPR 态的制备与发送由通信一方完成, 可以降低系统复杂度. 本文考虑由 Alice 制备 EPR 纠缠源, Alice 保留模 A_0 , 并将模 B_0 发送至 Bob, 此时, $T_1 = 1$, $T_2 = T$, $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon$.

在分析系统性能之前, 首先讨论增益系数 g 的选取. 因为在基于 NLA 的 CVQT 方案中, NLA 的增益系数是一个影响系统性能的重要参数. 根据 (9) 式和 (10) 式可以知道, 纠缠源参数 λ 、信道透

围, 且存在最大增益系数 $g_{\max}$. 在本文中, 以纠缠源参数取 0.5 和 0.7 两种情况为例进行讨论, 过噪声取固定值 0.05. 图 2 给出了在对称损耗信道和单边损耗信道情况下, $g_{\max}$ 随不同传输距离的取值变化. 从图 2 中的结果可以看出, 最大增益系数取值随着传输距离的增加而增大, 且单边损耗信道情况下最大增益系数大于对称损耗信道情况. 在损耗相同的情况下, λ 越大, 最大增益系数越小. 我们还发现, 在短传输距离区域, 最大增益系数取值很小, 这为选取适当的增益系数提供了依据.

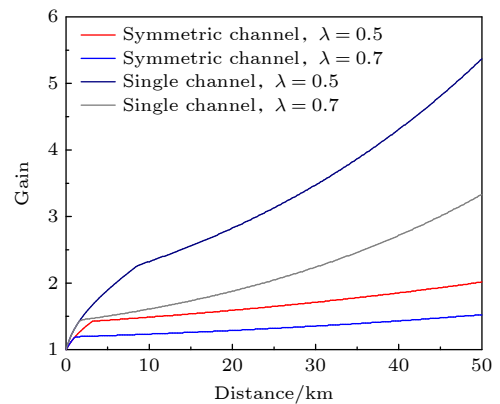


图 2 不同损耗信道中 NLA 增益系数随传输距离的变化关系
Fig. 2. The gain coefficient of NLA versus the transmission distance in different lossy channels.

接下来将分析讨论对称损耗信道和单边损耗信道情况下, 基于 NLA 的 CVQT 系统性能. 对于单边损耗信道情况, 图 3 给出了不同压缩水平纠缠源和不同 NLA 增益下系统保真度随传输距离变化的仿真结果, 其中红色实线表示 g 取最大值的结果, 虚线代表 g 取其他值的情形, 作为比较, 黑色实线表示原始方案性能. 此外, 图中蓝色实线代表相干态 CVQT 的经典界限, 即 $\mathcal{F}_{\text{classical}} = 0.5$, 因为利用无纠缠经典信道传送相干态所能达到的保真度为 0.5^[35]. 从图 3 中的结果可以看出, NLA 在各纠缠源情况下均可以提升系统的保真度和最大传输距离, 且增益系数 g 取值越大, 提升效果越显著. 图中填充区域表示取最大增益系数时所提方案相比原始方案的性能提升幅度, 比较图 3(a) 和图 3(b) 的填充区域面积可以发现, NLA 对系统的性能提升作用受纠缠源影响, λ 较小时提升作用越大. 这是

因为, 一方面, 较小的 λ 允许更大的增益, 更大增益的 NLA 对信道损耗的补偿作用也越显著; 另一方面, λ 越大, 短距离区域系统保真度越大, 使得 NLA 的提升水平相对原始方案来说变小了. 需要注意的是, 尽管更大的 NLA 增益可以对系统的保真度和传输距离有更显著的提升作用, 但 NLA 的作用是概率成功的, 且成功概率与增益系数值成负相关, 因此, 所选取的增益系数不能过大.

对于对称损耗信道情况, 同样分析了不同压缩水平纠缠源和不同 NLA 增益下系统保真度随传输距离的变化, 图 4 是对应的仿真结果. 与单边损耗信道情况相同, NLA 在不同 λ 情况下均可以提升 CVQT 系统性能, 且 λ 较小时提升效果更为显著, 在相同 λ 值情况下, g 越大保真度越高. 与之不同的是, 对称损耗信道方案具有更远的传输距离, 这是因为对称的损耗信道在保持纠缠源的高斯纠缠

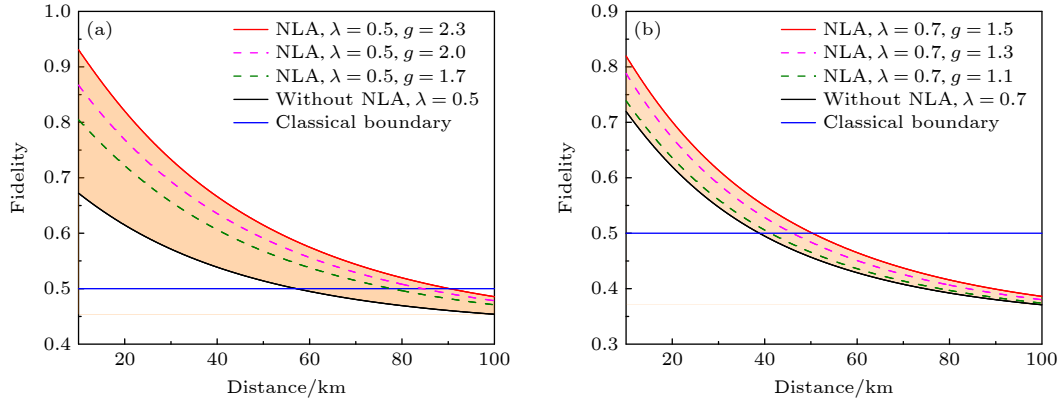


图 3 单边损耗信道情况下保真度随传输距离的变化关系 (a) EPR 态参数 $\lambda = 0.5$, 对应 NLA 增益系数 $g \in \{2.3, 2.0, 1.7\}$; (b) EPR 态参数 $\lambda = 0.7$, 对应 NLA 增益系数 $g \in \{1.5, 1.3, 1.1\}$

Fig. 3. The fidelity versus the transmission distance in single lossy channel case: (a) The EPR parameter $\lambda = 0.5$, the gain of NLA $g \in \{2.3, 2.0, 1.7\}$; (b) the EPR parameter $\lambda = 0.7$, the gain of NLA $g \in \{1.5, 1.3, 1.1\}$.

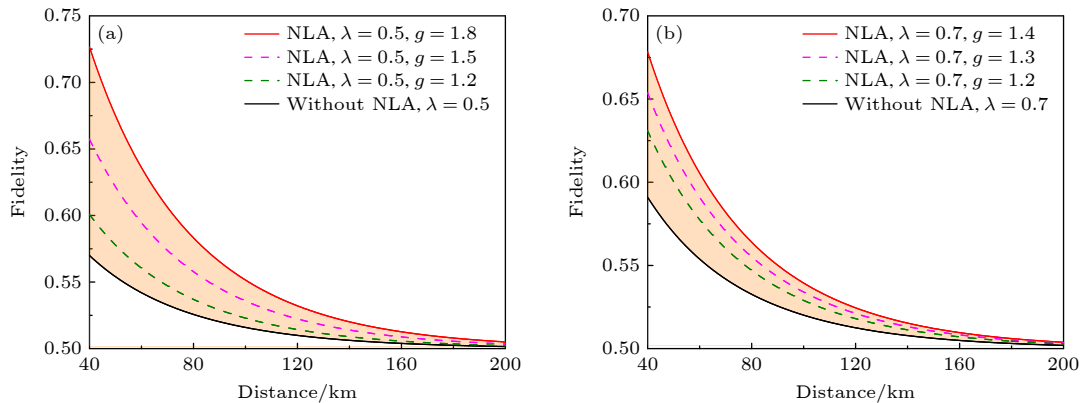


图 4 对称损耗信道情况下保真度随传输距离的变化关系 (a) EPR 态参数 $\lambda = 0.5$, 对应 NLA 增益系数 $g \in \{1.8, 1.5, 1.2\}$; (b) EPR 态参数 $\lambda = 0.7$, 对应 NLA 增益系数 $g \in \{1.4, 1.3, 1.2\}$.

Fig. 4. The fidelity versus the transmission distance in symmetrical lossy channel case: (a) The EPR parameter $\lambda = 0.5$, the gain of NLA $g \in \{1.8, 1.5, 1.2\}$; (b) the EPR parameter $\lambda = 0.7$, the gain of NLA $g \in \{1.4, 1.3, 1.2\}$.

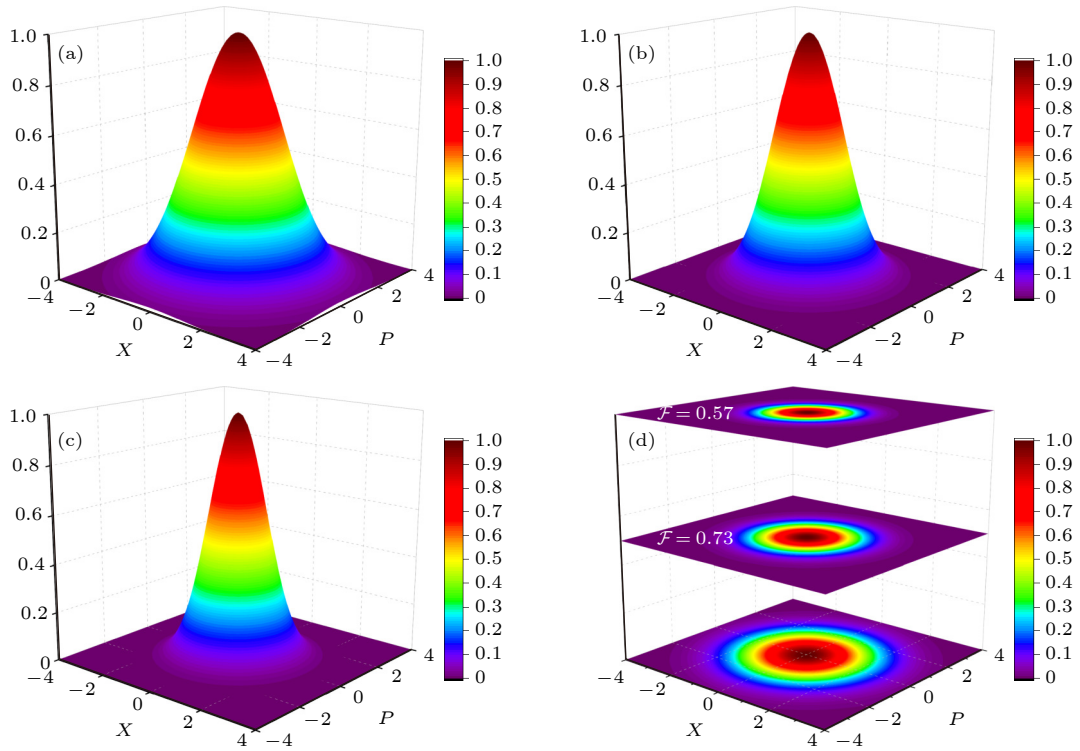


图 5 对称损耗信道情况下输入态与输出态的特征函数分布 (a) 输入态特征函数; (b) NLA 方案输出态特征函数; (c) 原始方案输出态特征函数; (d) 输入态与输出态的特征函数关于 X - P 平面投影

Fig. 5. Characteristic functions of input state and output state in symmetrical lossy channel case: (a) Characteristic function of input state; (b) characteristic function of output state with NLA; (c) characteristic function of output state without NLA; (d) projection of characteristic functions of input state and output state on X - P plane.

特性的同时, 实现了双边传输, Alice 与 Bob 之间的传输距离等于双方到 Charlie 的距离之和. 需要注意的是, 这种情况下信道是对称分布的, 且需要第三方 Charlie 参与通信, 传输距离大幅提升的同时也增加了系统复杂度. 我们还发现, 在对称损耗信道方案中, 保真度始终保持在不低于经典界限的水平, 这在单边损耗信道情况下是没有的. 此外, 对比图 4(a) 和图 4(b) 中 $g = 1.2$ 的结果可以发现, 在相同 NLA 增益情况下, 增大 λ 值可以获得更高的保真度.

从 (2) 式可以看出, 输出态与输入态的保真度可以由二者的特征函数表征, 其特征函数分布越接近, 则保真度越高. 为了进一步验证所提方案相对原始方案对提升系统保真度的有效性, 在图 5 中绘制了对称损耗信道情况下输入态与输出态的特征函数分布, 所选取纠缠源参数 $\lambda = 0.5$, 传输距离为 40 km. 其中图 5(a)—(c) 分别是输入态、所提方案输出态、原始方案输出态的特征函数, 图 5(d) 为三者在 X - P 平面的投影图. 比较图 5(a)—(c) 以及图 5(d) 中三者投影面积可以发现, 在相同传输距

离情况下, 所提方案输出态特征函数分布区域明显大于原始方案, 与输入态特征函数更接近, 对应的保真度分别为 0.73 与 0.57, 仿真结果与理论分析一致, 这也表明 NLA 确实在远距离相干态 CVQT 中发挥着显著优势.

4 结 论

本文提出了一种基于 NLA 的相干态 CVQT 方案, 分析了在光纤信道中, 单边损耗和对称损耗情况下 NLA 对 CVQT 系统性能的影响. 研究表明, 本文提出的方案在单边损耗信道情况和对称损耗信道情况下都能补偿信道损耗对纠缠源的衰减影响, 从而提高系统的性能. 根据数值仿真结果, 发现 NLA 的增益系数取值范围受纠缠源压缩水平和传输距离的影响, 且更大的增益系数对系统的保真度和最大传输距离有更好的提升效果. 在信道损耗相同的情况下, 纠缠源参数 λ 越小, NLA 的增益系数可取值越大, 提升效果也更为显著. 此外, 相比于单边损耗信道方案, 在对称损耗信道方案中,

需要第三方 Charlie 完成 EPR 纠缠源的制备与分发, 系统复杂度增加, 但是其传输距离得到大幅提高, 且保真度可以始终保持在不低于经典界限的水平. 总的来说, 本文提出的方案可以有效提升 CVQT 方案的性能, 为长距离 CVQT 方案的实际应用提供了一种切实可行的方法.

参考文献

- [1] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Hu X M, Zhang C, Liu B H, Cai Y, Ye X J, Guo Y, Xing W B, Huang C X, Huang Y F, Li C F, Guo G C 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 230501
- [4] Braunstein S L, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 869
- [5] Lee N, Benichi H, Takeno Y, Takeda S, Webb J, Huntington E, Furusawa A 2011 *Science* **332** 330
- [6] Huo M R, Qin J L, Cheng J L, Yan Z H, Qin Z Z, Su X L, Jia X J, Xie C D, Peng K C 2018 *Sci. Adv.* **4** eaas9401
- [7] Marcikic I, De Riedmatten H, Tittel W, Zbinden H, Gisin N 2003 *Nature* **421** 509
- [8] Yin J, Ren J G, Lu H, Cao Y, Yong H L, Wu Y P, Liu C, Liao S K, Zhou F, Jiang Y, Cai X D, Xu P, Pan G S, Jia J J, Huang Y M, Yin H, Wang J Y, Chen Y A, Peng C Z, Pan J W 2012 *Nature* **488** 185
- [9] Ren J G, Xu P, Yong H L, Zhang L, Liao S K, Yin J, Liu W Y, Cai W Q, Yang M, Li L, Yang K X, Han X, Yao Y Q, Li J, Wu H Y, Wan S, Liu L, Liu D Q, Kuang Y W, He Z P, Shang P, Guo C, Zheng R H, Tian K, Zhu Z C, Liu N L, Lu C Y, Shu R, Chen Y A, Peng C Z, Wang J Y, Pan J W 2017 *Nature* **549** 70
- [10] Vaidman L 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1473
- [11] Ralph T C, Lam P K 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5668
- [12] Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, Polzik E S 1998 *Science* **282** 706
- [13] Bowen W P, Treps N, Buchler B C, Schnabel R, Ralph T C, Bachor H A, Symul T, Lam P K 2003 *Phys. Rev. A* **67** 032302
- [14] Zhang T C, Goh K W, Chou C W, Lodahl P, Kimble H J 2003 *Phys. Rev. A* **67** 033802
- [15] Takei N, Aoki T, Koike S, Yoshino K I, Wakui K, Yonezawa H, Hiraoka T, Mizuno J, Takeoka M, Ban M, Furusawa A 2005 *Phys. Rev. A* **72** 042304
- [16] Takei N, Yonezawa H, Aoki T, Furusawa A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 220502
- [17] Dell'Anno F, De Siena S, Albano L, Illuminati F 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022301
- [18] Dell'Anno F, De Siena S, Illuminati F 2010 *Phys. Rev. A* **81** 012333
- [19] He G Q, Zhang J T, Zhu J, Zeng G H 2011 *Phys. Rev. A* **84** 034305
- [20] Hu L Y, Liao Z Y, Ma S L, Zubairy M S 2016 *Phys. Rev. A* **93** 033807
- [21] Hofmann K, Semenov A A, Vogel W, Bohmann M 2019 *Phys. Scr.* **94** 125104
- [22] Zuo Z Y, Wang Y J, Liao Q, Guo Y 2021 *Phys. Rev. A* **104** 022615
- [23] Villaseñor E, He M J, Wang Z Q, Malaney R, Win M Z 2021 *IEEE Trans. Quantum Eng.* **2** 4102118
- [24] Liu S H, Lou Y B, Jing J T 2020 *Nat. Commun.* **11** 3875
- [25] Chen X, Ou Z Y 2020 *Phys. Rev. A* **102** 032407
- [26] Asjad M, Qasymeh M, Eleuch H 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 034046
- [27] Fedorov K G, Renger M, Pogorzalek S, Di Candia R, Chen Q M, Nojiri Y, Inomata K, Nakamura Y, Partanen M, Marx A, Gross R, Deppe F 2021 *Sci. Adv.* **7** eabk0891
- [28] Zhao H, Feng J X, Sun J K, Li Y J, Zhang K S 2022 *Opt. Express* **30** 3770
- [29] Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J 2000 *J. Mod. Opt.* **47** 267
- [30] Fiurášek J 2002 *Phys. Rev. A* **66** 012304
- [31] Blandino R, Leverrier A, Barbieri M, Etesse J, Grangier P, Tualle-Broui R 2012 *Phys. Rev. A* **86** 012327
- [32] Bai D B, Huang P, Ma H X, Wang T, Zeng G H 2017 *Entropy* **19** 546
- [33] Zhang Y C, Li Z Y, Weedbrook C, Marshall K, Pirandola S, Yu S, Guo H 2015 *Entropy* **17** 4547
- [34] Bohmann M, Semenov A A, Sperling J, Vogel W 2001 *Phys. Rev. A* **64** 010302
- [35] Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, van Loock P 2001 *Phys. Rev. A* **64** 022321

Continuous variable quantum teleportation with noiseless linear amplifier^{*}

Wen Zhen-Nan¹⁾ Yi You-Gen¹⁾ Xu Xiao-Wen^{1)†} Guo Ying²⁾

1) (*School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China*)

2) (*School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China*)

(Received 18 December 2021; revised manuscript received 19 February 2022)

Abstract

Continuous variable quantum teleportation (CVQT) plays an important role in practical quantum communication. However, the noise and loss in the actual environment will lead to the degradation of entanglement, which has an effect on the performance of the system in terms of the transmission distance and hence hinders its implementations. In this paper, we suggest an approach to improving the performance of the CVQT system with an embedded noiseless linear amplifier (NLA). By using the NLA, one can amplify the degenerated entangled source to compensate for the attenuation of the fiber. Then we consider the influences of the available gains of the NLA on the performance of the proposed scheme under different lossy channels and entangled sources. The simulation results show that the performance is improved in fidelity and transmission distance, which may provide a feasible and effective method of putting the long-distance CVQT into practical application .

Keywords: continuous variable, quantum teleportation, lossy channel, noiseless linear amplifier

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Dd

DOI: [10.7498/aps.71.20212341](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212341)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61871407), and the Open Fund of Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, China (Grant No. GXKL06200208).

[†] Corresponding author. E-mail: xuxiaowen@csu.edu.cn