

多功能量子远程传态网络

周瑶瑶 刘艳红 闫智辉 贾晓军

A multifunctional quantum teleportation network

Zhou Yao-Yao Liu Yan-Hong Yan Zhi-Hui Jia Xiao-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 104203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201749

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201749>

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

度相关性对无向网络可控性的影响

Effect of degree correlations on controllability of undirected networks

物理学报. 2017, 66(2): 028901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.028901>

弱测量对四个量子比特量子态的保护

The protection of qudit states by weak measurement

物理学报. 2017, 66(1): 010301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.010301>

基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略

Parameters adaptive adjustment strategy of quantum communication channel in free-space based on software-defined quantum communication

物理学报. 2019, 68(14): 140302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190462>

基于电磁诱导透明机制的压缩光场量子存储

Analysis of electromagnetically induced transparency based on quantum memory of squeezed state of light

物理学报. 2017, 66(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074201>

基于量子隐形传态的量子保密通信方案

Quantum communication scheme based on quantum teleportation

物理学报. 2017, 66(23): 230303 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230303>

实验条件不完美对薛定谔猫态制备的影响

Effect of imperfect experimental condition on generation of Schrödinger cat state

物理学报. 2018, 67(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180381>

多功能量子远程传态网络*

周瑶瑶^{1)†} 刘艳红¹⁾ 闫智辉²⁾³⁾ 贾晓军²⁾³⁾

1) (太原师范学院物理系, 晋中 030619)

2) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2020 年 10 月 21 日收到; 2020 年 12 月 4 日收到修改稿)

连续变量量子远程传态在构建连续变量量子计算以及量子信息网络中发挥着重要作用. 随着量子信息研究的深入发展, 人们对多组份的量子远程传态以及它的灵活多样性、可控性等方面提出了更高的要求. 本文提出了一种多功能量子远程传态网络的理论构建方案, 首先将两对 Einstein-Podolsky-Rosen 纠缠态光场相互耦合, 获得具有特殊量子关联的 4 个光场模式, 然后以此为量子资源构建功能性完全不同的两类量子远程传态网络, 一类是仅能传送一个未知量子态的可控性量子远程传态网络, 一类是可以同时传送两个未知量子态的量子远程传态网络. 本文分别从控制方的数量、可传送未知量子态的数量、保真度等多方面分析了不同功能量子远程传态网络的应用特点及优势. 该方案中仅利用同一种量子资源实现了量子远程传态网络的多类型构建, 且量子资源的制备方式简易, 易于向更多组份扩展, 这些优势都为以后建立更大规模更加复杂的量子信息网络提供了更多更广阔的应用前景, 加快了量子信息实用化的步伐.

关键词: 量子远程传态网络, 可控性, 多功能, 保真度**PACS:** 42.50.-p, 42.50.Ex, 42.50.Lc, 03.67.Hk**DOI:** 10.7498/aps.70.20201749

1 引言

量子远程传态^[1-8]是最基本的量子协议之一, 它是利用分享的量子纠缠, 通过本地操作和经典通信, 将未知的量子态从一方传递到另一方, 而不需要信息载体的物理转移. 该量子协议已经被广泛应用于量子中继器、量子门远程传态、基于测量的量子计算和基于通道的远程传态等各种量子技术中, 这些量子技术在量子计算和量子信息中有着非常重要的应用价值^[9-16]. 量子远程传态的概念是 1993 年由 Bennett 等^[1]首次在分离变量领域提出来的,

1997 年, Bouwmeester 等^[2]利用纠缠光子对首次在实验上实现了量子远程传态. 1994 年, Vaidman^[17]提出了连续变量量子远程传态的方案, 该方案提出可以利用纠缠态光场、联合测量以及信息变换来实现未知态的传输. 1998 年, Furusawa 等^[6]利用两个单模压缩态光场实现了保真度为 0.58 的连续变量量子远程传态. 此后, 全世界各个研究小组一方面在理论上提出了多种量子远程传态的模型, 另一方面在实验上针对高保真度、长距离的传输指标取得了很多突破性的进展. 2017 年, 中国科技大学潘建伟教授领导的科研团队^[18]利用地球-卫星纠缠分发成功实现了跨越 1400 km 传输距离的远距离

* 国家自然科学基金 (批准号: 11804246, 11805141, 11904218, 12004276, 11847111, 61775127, 11654002)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301402)、山西省自然科学基金 (批准号: 201901D111293)、山西省高等学校创新人才支持计划资助、山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2019L0794, 2020L0516)、山西青年三晋学者项目、山西省“1331 工程”重点学科建设计划资助的课题、山西省高等学校创新人才支持计划和太原师范学院“1331 工程”项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouyaoyaofangxia@163.com

量子远程传态, 将量子远程传态的距离又提高了一个量级, 为构建全球规模的量子信息网络奠定了良好的基础. 2018 年, 本研究小组利用实验制备的 $1.3\ \mu\text{m}$ 波段的 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠态光场, 完成了 6 km 光纤通道连续变量的量子远程传态^[19].

利用两组份纠缠只能在两个量子节点之间传送未知量子态, 为了使量子信息的发展更接近实用化的需求, 人们对量子远程传态的多功能性和可控性等方面提出了更高的要求, 多组份的量子协议有望成为构建大规模量子信息和量子计算的基本组件^[20,21]. 将两组份量子远程传态扩展到多组份, 称为量子远程传态网络^[22,23]. 量子远程传态网络是一种基于多组份量子资源的量子通信网络, 在该网络中, 多个空间分离的用户提前共享所使用的多组份量子资源. 他们仅仅通过本地操作和经典信道来交流, 可以选择性的在量子网络中的特定节点之间传递未知量子态, 可以在多个控制方的控制下完成未知量子态的传递, 这为构建复杂多样性的量子通信和量子计算提供了基础. 分离变量领域中的多组份量子远程传态取得了不少进展, Karlsson 和 Bourennane^[24] 最早提出利用三组份纠缠态实现量子远程传态的方案, 通过使用三组份纠缠态, 被发送的量子态可以选择性地在两个接收者中的任意一处来恢复和重建. 之后国内外各个研究小组也纷纷开展了量子远程传态网络的研究, 基于各式各样的多组份量子资源, 提出了多种量子远程传态的理论及实验方案^[25–30]. 比如 Lee 等^[25,26] 分析了环境噪声对量子远程传态结果的影响, 指出初始态的纯度对于确定重构态的纠缠具有重要的意义. 还提出了利用多组份纠缠实现纠缠态传送的方法. Chen 等^[27] 设计了一种新的量子通信网络系统, 提出仅通过一个控制器实现多发送方和多接收方之间的远程传态协议. 该量子通信网络中的控制器可以方便地监控收发站点之间的通信, 从而通过编码降低公共信道中经典通信的通信成本. 中国科技大学郭光灿研究小组^[28] 提出了利用非最大纠缠量子通道实现纠缠态的远程传送, 并且给出了实验成功几率的计算方法.

相较于分离变量的量子远程传态, 由于光模式量子远程传态的近似确定性, 使得研究连续变量领域中的量子远程传态网络方案成为必然^[31]. 2004 年, Furusawa 研究组^[23] 提出并实验构建了

利用一个三组份 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 纠缠态光场实现三节点的量子远程传态网络. 文中提出, 任意两个节点在第三方的配合下都能够成功实现量子远程传态. He 等^[32,33] 提出了利用不同类型的纠缠态光场来实现连续变量多用户之间量子远程传态的理论方案. 他们提出利用连续变量 EPR 纠缠对和经典通信可以实现多模纠缠态中单个模态的量子传送, 还可以利用 Graph 态的纠缠特性, 实现量子态在两个站点间的多路径传送. 更多组份的, 更加多变的量子远程传态网络可为大规模的量子通信以及复杂的量子计算提供更好的基础组件, 加快量子信息实用化的步伐. 本文首先提出利用两对 EPR 纠缠态光场耦合的形式来获得具有特殊量子关联的 4 个光场模式, 然后以此为量子资源提出构建一种多功能的量子远程传态网络, 一方面可以利用 4 个光场模式之间的量子关联构建包含一个发送方, 一个接收方以及两个控制方的量子远程传态网络; 另一方面可以利用 4 个光场模式中两个光场模式之间的量子关联, 构建包含两个量子远程传态过程的量子网络. 针对这两类不同的量子网络, 本文分别从控制方的数量, 可传送未知量子态的数量, 保真度的大小等方面进行了详细地对比分析, 得出不同类型量子远程传态网络的应用特点及优势, 为今后实现更加灵活多样的量子通信及量子计算网络提供了必要的量子组件.

2 网络构建及理论分析

在连续变量的量子远程传态中, 要传送的量子态是电磁场模式的量子态, 采用 Heisenberg 图来表示量子态的演化. 光场模式可由湮灭算符 $\hat{a} = \hat{x} + i\hat{p}$ 来表示, 它的实部和虚部分别对应振幅分量算符和位相分量算符, 算符满足对易关系 $[\hat{x}, \hat{p}] = 2i$, 这样正交振幅分量和正交位相分量的海森堡不确定关系可以表示为 $\Delta\hat{x}\Delta\hat{p} \geq 1$, 其中的 $\Delta\hat{x} = \sqrt{\langle\hat{x}^2\rangle - \langle\hat{x}\rangle^2}$ 表示标准差, 1 表示真空态光场噪声起伏的标准方差. 根据海森堡不确定关系, 若其中一个正交分量的量子起伏小于 1, 那么另一个正交分量的量子起伏必然大于 1, 这就说明量子起伏小于 1 的正交分量被压缩了, 这样的量子态被称之为压缩态^[34,35]. 理论和实验已经证明, 利用量子资源来进行量子态的远距离传输, 其保真度可以突破量子远程传态的经典极限值, 制备合适的量子资源是建立量子远程

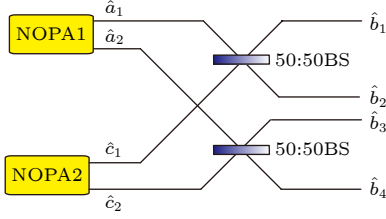


图 1 四组份量子资源的产生装置原理图

Fig. 1. Schematic diagram of four-partite quantum resource generation system.

传态网络的基础. 如图 1 所示为本文所提出的 4 组份量子资源的产生装置原理图, 将由两个非简并的光学参量放大器 (non-degenerate optical parametric amplifier, NOPA) 产生的两对 EPR 纠缠子模 \hat{a}_1, \hat{a}_2 以及 \hat{c}_1, \hat{c}_2 以图示方式分别在两个 50/50 的分束器上耦合, 可以得到有一定量子关联的 4 个子模 $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3, \hat{b}_4$, 分别表示为

$$\hat{b}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_1 + \hat{c}_1), \quad (1)$$

$$\hat{b}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_1 - \hat{c}_1), \quad (2)$$

$$\hat{b}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_2 + \hat{c}_2), \quad (3)$$

$$\hat{b}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_2 - \hat{c}_2). \quad (4)$$

为了方便描述, 这里假设两对 EPR 纠缠态光场的产生装置 NOPA1 和 NOPA2 结构完全相同, 所产生的纠缠态光场的关联特性完全相同. 纠缠态光场 \hat{a}_1 和 \hat{a}_2 (\hat{c}_1 和 \hat{c}_2) 由工作在参量反放大状态下的 NOPA1(NOPA2) 输出得到 [36], 它们与该腔输入相干态光场的振幅分量和位相分量之间的关系满足以下表达式:

$$\hat{x}_{a_1(c_1)} = \frac{1}{2}[\hat{x}_{a_1(c_1)}^0(e^{r+r'} + e^{-r}) - \hat{x}_{a_2(c_2)}^0(e^{r+r'} - e^{-r})], \quad (5)$$

$$\hat{x}_{a_2(c_2)} = \frac{1}{2}[\hat{x}_{a_2(c_2)}^0(e^{r+r'} + e^{-r}) - \hat{x}_{a_1(c_1)}^0(e^{r+r'} - e^{-r})], \quad (6)$$

$$\hat{p}_{a_1(c_1)} = \frac{1}{2}[\hat{p}_{a_1(c_1)}^0(e^{r+r'} + e^{-r}) + \hat{p}_{a_2(c_2)}^0(e^{r+r'} - e^{-r})], \quad (7)$$

$$\hat{p}_{a_2(c_2)} = \frac{1}{2}[\hat{p}_{a_2(c_2)}^0(e^{r+r'} + e^{-r}) + \hat{p}_{a_1(c_1)}^0(e^{r+r'} - e^{-r})], \quad (8)$$

其中, $\hat{x}_{a_1(2)}$ 和 $\hat{p}_{a_1(2)}$ 分别表示 NOPA1 输出纠缠态

光场两束纠缠子模的振幅分量算符和位相分量算符. $\hat{x}_{a_1}^0(\hat{p}_{a_1}^0)$ 和 $\hat{x}_{a_2}^0(\hat{p}_{a_2}^0)$ 分别表示 NOPA1 输入相干态光场的信号光场和闲置光场的振幅 (位相) 分量算符. $\hat{x}_{c_1(2)}$ 和 $\hat{p}_{c_1(2)}$ 分别表示 NOPA2 输出纠缠态光场两束纠缠子模的振幅分量算符和位相分量算符. $\hat{x}_{c_1}^0(\hat{p}_{c_1}^0)$ 和 $\hat{x}_{c_2}^0(\hat{p}_{c_2}^0)$ 分别表示 NOPA2 输入相干态光场的信号光场和闲置光场的振幅 (位相) 分量算符. r 表示压缩因子, r' 表示反压缩因子. 根据参考文献 [36] 中 EPR 纠缠态光场的量子关联噪声测量结果, 文中选择压缩因子 r 和反压缩因子 r' 之间的关系为 $r' = \frac{2}{3}r$ 来进行理论计算. 结合式 (1)–式 (8), 可以得到 4 个子模 $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3, \hat{b}_4$ 的振幅分量 \hat{x}_{b_j} ($j = 1, 2, 3, 4$) 以及位相分量 \hat{p}_{b_j} ($j = 1, 2, 3, 4$) 之间的量子关联噪声满足以下表达式:

$$V(\hat{x}_{b_1} + \hat{x}_{b_2} + \hat{x}_{b_3} + \hat{x}_{b_4}) = 4e^{-2r}, \quad (9)$$

$$V(\hat{p}_{b_1} + \hat{p}_{b_2} - \hat{p}_{b_3} - \hat{p}_{b_4}) = 4e^{-2r}. \quad (10)$$

式 (9) 和式 (10) 表明, 输出 4 个子模正交振幅分量以及正交位相分量之间的量子关联噪声均小于相应的散粒噪声基准 4, 他们之间的量子关联特性可以用于构建四用户的连续变量量子远程传态网络.

如图 2 所示为将一个未知量子态传送至 Claire 处的 4 组份量子远程传态网络的结构示意图. 该方案中以传送相干态为例来进行说明, 除了相干态以外, 压缩态、纠缠态等非经典态都可以作为传送的未知量子态.

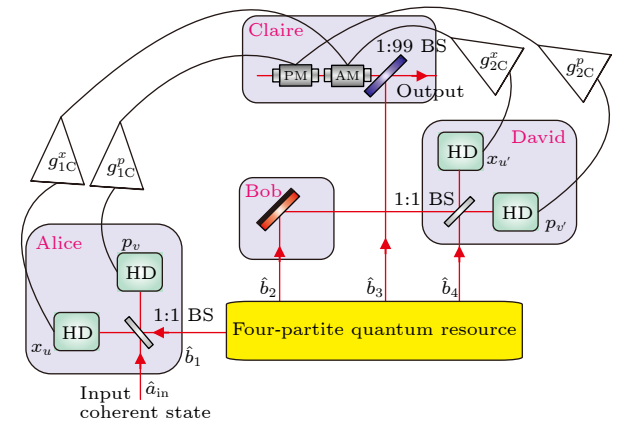


图 2 将一个未知量子态传送至 Claire 处的四组份量子远程传态网络的结构示意图, 其中 AM 为振幅调制器, PM 为位相调制器, BS 为分束器, HD 为平衡零拍探测器

Fig. 2. Schematic diagram of four-partite quantum teleportation network teleporting an unknown quantum state to Claire, where AM is Amplitude modulator, PM is Phase modulator, BS is Beam splitter, HD is Homodyne detector.

在传送未知量子态之前, 首先将具有一定量子关联的 4 个光场模式 $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3, \hat{b}_4$ 分别发送给空间分离的 4 个用户 Alice, Bob, Claire 和 David, 这 4 个用户可以选择作为发送方, 接收方或者控制方中的任意一个来参与量子远程传态的过程, 4 个用户的角色组合形式有多种, 图 2 中 4 个用户的角色组合形式为: Alice 作为发送方, Claire 作为接收方, Bob 和 David 都作为控制方. 首先 Alice 将被传递的相干态 \hat{a}_{in} 与它自己所拥有的子模 \hat{b}_1 进行 Bell 联合测量, Bell 联合测量系统包括一个 50:50 的光学分束器和两套平衡零拍探测系统. 分束器的输出光场可以标记为 $\hat{x}_u = (\hat{x}_{\text{in}} + \hat{x}_{b_1})/\sqrt{2}$, $\hat{p}_v = (\hat{p}_{\text{in}} - \hat{p}_{b_1})/\sqrt{2}$, 其中 $\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}$ 分别表示被传递相干态的振幅分量和位相分量算符, 再利用两套平衡零拍探测系统来获取振幅分量和位相分量信息. 为了保证重构量子态与输入量子态的一致性, 控制方 Bob 和 David 将二者所拥有的子模耦合, 也实行 Bell 联合测量, 分束器的输出光场可以标记为 $\hat{x}_{u'} = (\hat{x}_{b_2} + \hat{x}_{b_4})/\sqrt{2}$, $\hat{p}_{v'} = (\hat{p}_{b_4} - \hat{p}_{b_2})/\sqrt{2}$, 再利用两套平衡零拍探测系统来获取振幅分量和位相分量信息. 为了使 Claire 能够重构出被传送的量子态, 发送方通过经典信道将自己的测量结果以一定的增益因子发送给接收方, 同时控制方也将 Bell 联合测量后的经典信息以一定的增益因子发送给接收方, Claire 利用振幅调制器和位相调制器将其所接收到的振幅分量信息和位相分量信息调制在一束独立的激光上, 最后再将该激光与自己接收到的子模 \hat{b}_3 在 1:99 的分束器上耦合来重构被传送的量子态, 重构后的量子态可以表示为

$$\begin{aligned}\hat{x}_{\text{tel}}^C &= \hat{x}_{b_3} + \sqrt{2}g_{1C}^x \hat{x}_u + \sqrt{2}g_{2C}^x \hat{x}_{u'} \\ &= \hat{x}_{b_3} + g_{1C}^x (\hat{x}_{\text{in}} + \hat{x}_{b_1}) + g_{2C}^x (\hat{x}_{b_2} + \hat{x}_{b_4}),\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}\hat{p}_{\text{tel}}^C &= \hat{p}_{b_3} + \sqrt{2}g_{1C}^p \hat{p}_v + \sqrt{2}g_{2C}^p \hat{p}_{v'} \\ &= \hat{p}_{b_3} + g_{1C}^p (\hat{p}_{\text{in}} - \hat{p}_{b_1}) + g_{2C}^p (\hat{p}_{b_4} - \hat{p}_{b_2}),\end{aligned}\quad (12)$$

其中 $g_{1C}^x, g_{1C}^p, g_{2C}^x, g_{2C}^p$ 分别为各站点反馈经典信号的增益因子, 在理想情况下, 即当压缩参数 r 趋近于无穷时, 4 个子模之间的量子关联满足表达式 $V(\hat{x}_{b_1} + \hat{x}_{b_2} + \hat{x}_{b_3} + \hat{x}_{b_4}) = 4e^{-2r} \rightarrow 0$, $V(\hat{p}_{b_1} + \hat{p}_{b_2} - \hat{p}_{b_3} - \hat{p}_{b_4}) = 4e^{-2r} \rightarrow 0$, 此时如果将经典反馈增益因子全都取值为 1, 根据式 (11) 和 (12), 被重构的量子态就可以表示为 $\hat{x}_{\text{tel}}^C = \hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{tel}}^C = \hat{p}_{\text{in}}$, 输出态和输入态完全相吻合. 但通常情况下, 光场的压缩

度是有限的, 即 r 是有限数值, 量子远程传态所重构的输出态不完全等同于输入态, 需要通过调节增益因子的大小来尽可能地使输出态的特性接近于输入态. 在量子信息研究中, 一般是用保真度 $F = \langle \psi_{\text{in}} | \hat{\rho}_{\text{out}} | \psi_{\text{in}} \rangle$ 来衡量输出态和输入态的重叠程度^[37,38], 其中 ψ_{in} 表示输入态, $\hat{\rho}_{\text{out}}$ 表示输出态的密度矩阵, 若传送的未知态为相干态, 保真度又可以表示为与量子关联噪声有关的表达式: $F = 2/(\sqrt{1+\sigma_x} \times \sqrt{1+\sigma_p})$, 其中 $\sigma_x = V(\hat{x}_{\text{tel}}), \sigma_p = V(\hat{p}_{\text{tel}})$ ^[22]. 为了保证重构量子态与输入量子态的一致性, 将 g_{1C}^x, g_{1C}^p 两个增益因子取单位增益 1, 增益因子 g_{2C}^x, g_{2C}^p 取相同的值 g , 此时重构后的量子态可以表示为

$$\hat{x}_{\text{tel}}^C = \hat{x}_{\text{in}} + \hat{x}_{b_1} + \hat{x}_{b_3} + g(\hat{x}_{b_2} + \hat{x}_{b_4}),\quad (13)$$

$$\hat{p}_{\text{tel}}^C = \hat{p}_{\text{in}} + \hat{p}_{b_3} - \hat{p}_{b_1} + g(\hat{p}_{b_4} - \hat{p}_{b_2}).\quad (14)$$

将式 (1)–(8)、式 (13) 和 (14) 结合起来, 代入保真度的表达式, 可以理论计算出保真度的大小随增益因子的变化曲线, 如图 3 所示. 曲线 1, 2, 3 分别对应压缩度为 0.5, 0.8 和 1.5 的情况, 对于同一个增益因子, 显然曲线 3 对应的保真度大于曲线 2 对应的保真度, 曲线 2 对应的保真度又大于曲线 1 对应的保真度, 都大于经典边界值 0.5, 成功实现了相干态的传送, 说明可以通过提高压缩参数来提高保真度的大小. 单条曲线来看, 保真度随着增益因子的增大而减小, 在 g 为 0 时, 保真度最大, 这里将使保真度最大的增益因子的取值称之为最佳增益因子. 也就是说在图 2 所示的量子远程传态方

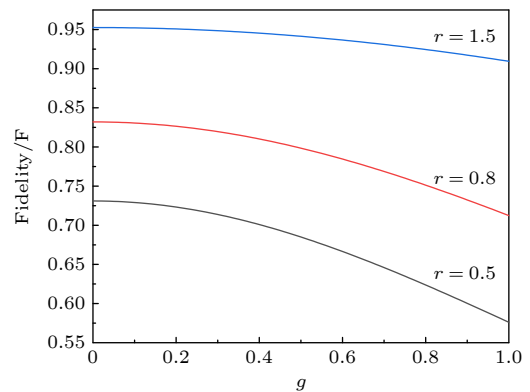


图 3 四用户量子远程传态保真度随增益因子 g 的变化曲线, 曲线 1—3 分别对应压缩参数为 0.5, 0.8 和 1.5 时的保真度大小

Fig. 3. Dependences of the fidelity of quantum teleportation with four parties on gain factor g , the traces 1, 2 and 3 are the calculated fidelity when squeezing factor r is selected as 0.5, 0.8 and 1.5, respectively.

案中, 控制方的最佳增益因子为 0, 正好对应仅有发送者和接收者参与的两用户量子远程传态的情况, 图 3 的曲线表明, 两用户的量子远程传态保真度大于四用户的量子远程传态保真度的最佳值. 但如果为了构建包含 4 个用户的较为复杂的量子远程传态网络系统, g 因子不能取值为 0, 较小的 g 因子可以得到较高的保真度.

以上的理论分析过程中, 4 个用户的角色组合形式与图 2 所示的方案相对应, 除此之外, 还有多种其他组合形式, 也就是说, 一方面发送方可根据需求选择合适的经典信道来传送量子态, 一方面可根据需求在某两个量子节点之间传送量子态. 需要注意的是, 根据式 (11) 和 (12) 或者式 (13) 和 (14) 所示的重构量子态的表达式, 为了使最终被恢复的量子态的表达式接近 4 个子模之间的量子关联方式 (式 (9) 和 (10)), 4 个用户的角色组合形式不能出现 Alice 和 Bob 或者 Claire 和 David 同时为控制方的情况, 其他任意的组合形式都可以用与图 2 类似的方式来构建量子远程传态网络, 并且因为图 1 所示 4 组量子资源制备方式的对称性, 不同组合形式下量子远程传态的效果相同.

该四用户的量子远程传态网络中, 有两个控制方 Bob 和 David, 他们可以控制自己是否参与该过程来控制量子远程传态的成败. 如果控制方 Bob(David) 拒绝贡献自己所接收到子模的信息, 只有 David(Bob) 通过平衡外差探测系统将自己所接收到子模的振幅分量信息和位相分量信息发送给接收方 Claire, Claire 通过平移操作后重构的量子态可以表示为:

$$\hat{x}_{\text{tel}}^C = \hat{x}_{\text{in}} + \hat{x}_{b_1} + \hat{x}_{b_3} + g(\hat{x}_b^0 + \hat{x}_{b_4}), \quad (15)$$

$$\hat{p}_{\text{tel}}^C = \hat{p}_{\text{in}} + \hat{p}_{b_3} - \hat{p}_{b_1} + g(\hat{p}_{b_4} - \hat{p}_b^0), \quad (16)$$

其中 \hat{x}_b^0 , \hat{p}_b^0 分别表示平衡外差探测系统中真空光场的振幅分量和位相分量算符, 将式 (1)–(8)、式 (15) 和 (16) 结合起来, 代入保真度的公式, 理论计算了当压缩参数 $r = 1.5$ 时, 只有一个控制方以及两个控制方同时参与的量子远程传态网络的保真度随 g 的变化曲线对比图, 如图 4 所示. 曲线 1 对应两个控制方同时参与的情况, 曲线 2 对应只有一个控制方参与的情况, 显然, 当增益因子以及压缩参数取值相同时, 曲线 2 所示的保真度一直小于曲线 1 所示的保真度, 这是因为相较于四用户之间的量子关联, 三用户之间的量子关联较弱, 且平衡外

差探测过程中真空光场噪声的引入也减小了远程传态的保真度. 曲线 2 与远程传态的经典极限值 0.5 相交于临界点, 当增益因子 g 大于该临界值时, 保真度小于 0.5, 量子远程传态过程失败. 两条曲线的对比说明, 控制方可以控制自己是否参与量子远程传态的过程来影响该过程的成败, 使得该网络具有可控性.

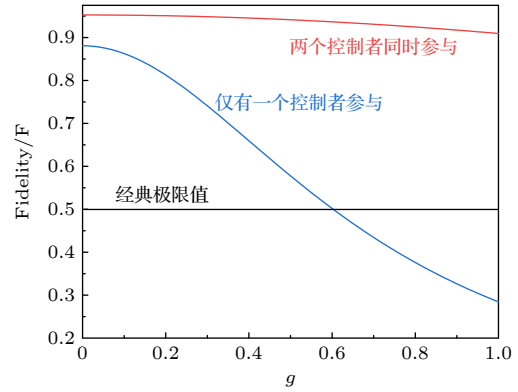


图 4 控制方数量不同的量子远程传态保真度随增益因子 g 的变化曲线对比图, 曲线 1 表示有两个控制者参与时的保真度, 曲线 2 表示仅有一个控制者参与时的保真度, 曲线 3 表示远程传态保真度的经典极限值

Fig. 4. Dependences of the fidelity of quantum teleportation with different number of controllers on gain factor g , trace 1 is the calculated fidelity of quantum teleportation with two controllers, trace 2 is the calculated fidelity of quantum teleportation with only one controller, trace 3 is the classical limit of quantum teleportation.

考虑这 4 个子模中, 任意两者之间的量子关联情况. 根据图 1 所示的制备原理图, 显然子模 \hat{b}_1 和 \hat{b}_2 以及子模 \hat{b}_3 和 \hat{b}_4 之间没有任何的量子关联. 将式 (1)–(8) 结合起来, 理论计算得到两个子模 $\hat{b}_{1(2)}$ 和 $\hat{b}_{3(4)}$ 的振幅分量以及位相分量之间的量子关联噪声, 表示为

$$V(\hat{x}_{b_{1(2)}} + \hat{x}_{b_{3(4)}}) = 2e^{-2r}, \quad (17)$$

$$V(\hat{p}_{b_{1(2)}} - \hat{p}_{b_{3(4)}}) = 2e^{-2r}. \quad (18)$$

该公式表明, 子模 $\hat{b}_{1(2)}$ 和 $\hat{b}_{3(4)}$ 的正交振幅分量以及正交位相分量之间的量子关联噪声小于散粒噪声基准线 2. 如果利用两个子模之间的量子关联来构建量子远程传态网络, 该网络可以同时传送两个不同的未知量子态, 增加了可传送量子态的数量及种类. 4 个用户中, 只要二者所拥有的子模相互关联, 就可以作为发送方和接收方来传送量子态, 组合形式种类多样, 同样因为 4 组量子资源制备

方式的对称性, 不同组合形式下量子远程传态的效果相同. 图 5 所示为其中一种组合形式下, 可同时传送两个未知量子态的量子远程传态网络的结构示意图. 图中包括两个量子远程传态的过程, 一个是 Alice 作为发送方, Claire 作为接收方, 另一个是 Bob 作为发送方, David 作为接收方, 这两个过程的量子远程传态效果相同, 下面以 Alice 发送量子态给 Claire 为例进行理论分析. 该量子远程传态过程中, 最终 Claire 所重构的未知量子态的表达式与式 (13) 和 (14) 类似, 不同的是, 该过程仅包含了必要的发送方和接收方, 因为没有其他任何控制者的参与, 控制方的经典反馈增益因子 g_{2C}^x , g_{2C}^p 的取值为 0, 结合保真度的计算公式, 理论计算得到了保真度的大小随压缩参数 r 的变化曲线, 如图 6 中的曲线 1 所示. 该曲线变化趋势表明, 当压缩参数 r 等于零时, 保真度的大小为量子远程传态的经典极限值 0.5, 因为没有用到量子资源, 此时无法实现真正意义上的量子远程传态. 而当压缩参数 r 大于 0 后, 相应的保真度大于经典极限值 0.5, 成功实现量子远程传态. 随着压缩参数 r 的持续增大, 对应的保真度也持续增大, 直至 r 趋近于无穷大时, 保真度趋近于理想值 1, 说明更大的压缩参数, 即高质量的量子资源可以更高质量的传送未知量子态, 使得重构量子态的量子特性更接近于被传

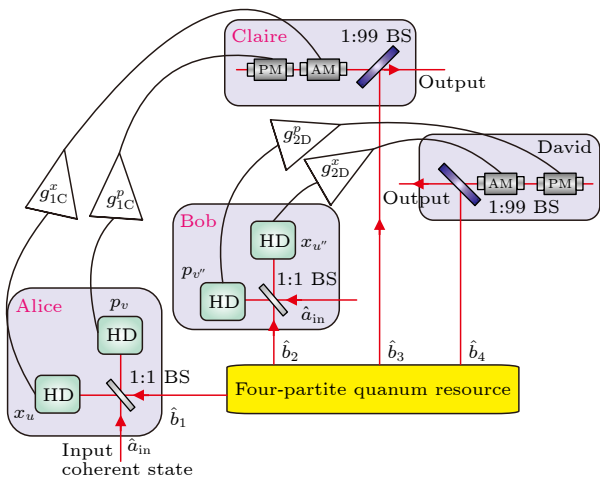


图 5 可同时传送两个未知量子态的量子远程传态网络结构示意图, 其中 AM 为振幅调制器, PM 为位相调制器, BS 为分束器, HD 为平衡零拍探测器

Fig. 5. Schematic diagram of four-partite quantum teleportation network that can simultaneously teleport two unknown quantum states, where AM is Amplitude modulator; PM is Phase modulator, BS is Beam splitter, HD is Homodyne detector.

送量子态的量子特性. 为了方便对比四用户和两用户量子远程传态的效果, 同时理论计算了四用户量子远程传态过程中, 当控制方增益因子分别取值为 0.5, 0.8 和 1 时, 保真度随压缩参数 r 的变化曲线, 分别对应图 6 中的曲线 2, 3 和 4. 图 6 中的曲线 1 同时也对应四用户量子远程传态过程中两个控制方增益因子为 0 的情况. 这四条曲线的变化趋势一致, 保真度都随着压缩参数的增大而增大, 且和量子远程传态的经典极限值 0.5 相交于不同的临界点, 当压缩参数大于相应的临界点时, 保真度大于 0.5, 才能实现真正意义上的量子远程传态, 否则量子态的传送过程失败. 说明增益因子和压缩参数同时影响保真度的大小, 在压缩参数一定的情况下, 必须选择合适的增益因子, 才能真正实现成功的量子远程传态.

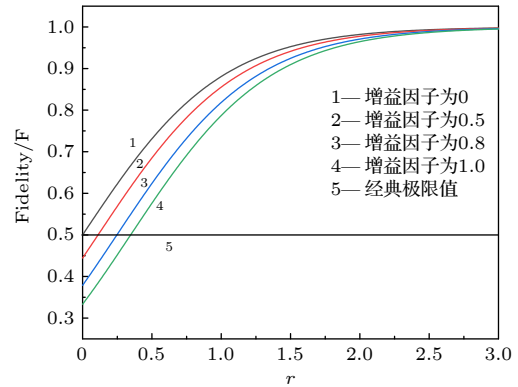


图 6 量子远程传态保真度随压缩参数 r 的变化曲线, 曲线 1—4 分别对应增益因子为 0, 0.5, 0.8 和 1 时的保真度大小, 曲线 5 表示远程传态保真度的经典极限值

Fig. 6. Dependences of the fidelity of quantum teleportation on squeezing factor r , the traces 1, 2, 3 and 4 are the calculated fidelity when gain factor is selected as 0, 0.5, 0.8 and 1, respectively, trace 5 is the classical limit of quantum teleportation.

图 1 所示量子资源的制备装置所包含的光学谐振腔, 光学分束器等光学元件较少, 操作简易, 输出的 4 个光场模式之间具有多种量子关联特性, 仅仅利用这一种量子资源, 就可以构建功能性完全不同的量子远程传态网络, 实现了多功能量子远程传态网络的构建.

在真实的量子系统中, 非经典光场如压缩态光场、纠缠态光场, 对光学损耗特别敏感, 不可避免的光学损耗会在一定程度上破坏非经典光场的量子特性 [39–42]. 例如量子通信网络中经常需要将所

使用的量子资源通过光纤等量子通道在空间分离的量子节点之间进行传输, 而光纤的传输损耗以及光纤中由于布里渊散射引入的额外噪声将会引起量子资源的退相干, 并缩短量子远程传态的传输距离, 为了减小额外噪声, 实验中可以利用偏振复用的方法将纠缠光束和本底振荡光束同时导入光纤传输, 经过一段距离后, 将光束导出并利用偏振分束棱镜将其分开^[19]. 再例如探测器的探测效率也会引起量子远程传态保真度的降低, 在连续变量量子系统中, 德国的 Laser Components GmbH 公司生产的 InGaAs 光电探测器的探测效率可达 98% 以上^[43], 对最终保真度的影响较弱. 如果能进一步提高量子光场之间的量子关联特性以及减小光纤传输损耗和额外噪声, 对提高量子远程传态的质量具有重要作用.

3 结 论

本文首先提出利用两对 EPR 纠缠态光场耦合的方法来获得四组份量子资源, 该量子资源的 4 个子模以及 2 个子模之间都有一定的量子关联, 然后利用他们之间特殊的关联性质, 提出了一种多功能量子远程传态网络的理论构建方案. 包括两种类型, 第一种是建立包含有发送者, 接收者, 以及控制者的可控性量子远程传态网络, 该网络包含多个量子节点, 它的特点在于: 一方面多的量子节点数量为发送方在传送经典信息时提供了多个选择通道, 可以根据实际需求选择在某 2 个节点之间传递量子态; 另一方面因为多个量子节点所拥有子模之间的相互量子关联, 发送方和接收方可能需要控制方的协助, 控制者可以控制自己是否参与该过程来操控量子远程传态的成败, 使得量子远程传态网络具有可控性. 第二种是建立包含有 2 个量子远程传态过程的量子网络系统, 每个远程传态过程仅仅包含一个发送者和一个接收者, 没有控制者的参与, 该网络的特点在于, 可以同时传送两个不同的未知量子态, 并且两个过程互不影响. 针对两种功能性不同的量子远程传态网络, 详细分析了压缩因子、增益因子对量子态重构保真度的影响, 结果表明, 高的压缩度和最佳增益因子可以获得较高的保真度. 本文所提出的多功能量子远程传态网络, 丰富了量子态的传递方向与方式, 传递数量和种类; 且

操作简单, 易于操控, 易于向多组份扩展, 这些优势都为今后建立更加复杂, 更加灵活多变的量子信息网络提供了更多更广阔的应用前景.

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] Boschi D, Branca S, Martini F D, Hardy L, Popescu S 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1121
- [4] Nielsen M A, Knill E, Laflamme R 1998 *Nature* **396** 52
- [5] Marcikic I, Riedmatten H D, Tittel W, Zbinden H, Gisin N 2003 *Nature* **421** 509
- [6] Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, Polzik E S 1998 *Science* **282** 706
- [7] 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
- [8] Zhang T C, Goh K W, Chou C W, Lodahl P, Kimble H J 2003 *Phys. Rev. A* **67** 033802
- [9] Su X L, Tian C X, Deng X W, Li Q, Xie C D, Peng K C 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 240503
- [10] Pan J W, Bouwmeester D, Weinfurter H, Zeilinger A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3891
- [11] Makino K, Hashimoto Y, Yoshikawa J I, Ohdan H, Toyama T, Look P V, Furusawa A 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501772
- [12] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, Zoller P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932
- [13] Xu J S, Yung M H, Xu X Y, Tang J S, Li C F, Guo G C 2016 *Sci. Adv.* **2** e1500672
- [14] Gottesman D, Chuang I L 1999 *Nature* **402** 390
- [15] Raussendorf R, Briegel H J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5188
- [16] Bouchard F, Fickler R, Boyd R W, Karimi E 2017 *Sci. Adv.* **3** e1601915
- [17] Vaidman L 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1473
- [18] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. 2017 *Nature* **549** 70
- [19] 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
- [20] Su X L, Zhao Y P, Hao S H, Jia X J, Xie C D, Peng K C 2012 *Opt. Lett.* **37** 5178
- [21] Yukawa M, Ukai R, Look P V, Furusawa A 2008 *Phys. Rev. A* **78** 012301
- [22] Look P V, Braunstein S L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3482
- [23] Yonezawa H, Aoki T, Furusawa A 2004 *Nature* **431** 430
- [24] Karlsson A, Bourennane M 1998 *Phys. Rev. A* **58** 4394
- [25] Lee J, Kim M S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4236
- [26] Lee J, Min H, Oh S D 2002 *Phys. Rev. A* **66** 052318
- [27] Chen X B, Xu G, Yang Y X, Wen Q Y 2010 *Opt. Commun.* **283** 4802
- [28] Zheng Y Z, Gu Y J, Guo G C 2002 *Chin. Phys. B* **11** 537
- [29] Man Z X, Xia Y J, An N B 2007 *Phys. Rev. A* **75** 052306
- [30] Li S S, Nie Y Y, Hong Z H, Yi X J, Huang Y B 2008 *Commun. in Theoretical Phys.* **50** 633
- [31] Pirandola S, Eisert J, Weedbrook C, Furusawa A, Braunstein S L 2015 *Nat. Photonics* **9** 641
- [32] He G Q, Zhang J T, Zeng G H 2008 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **41** 215503
- [33] Ren L J, He G Q, Zeng G H 2008 *Phys. Rev. A* **78** 042302
- [34] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt.*

- Express* **15** 4321
- [35] Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Lastzka N, Gößler S, Danzmann K, Schnabel R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033602
- [36] Zhou Y Y, Jia X J, Li F, Xie C D, Peng K C 2015 *Opt. Express* **23** 4952
- [37] Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J 2000 *J. Mod. Opt.* **47** 267
- [38] Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, Loock P V 2001 *Phys. Rev. A* **64** 022321
- [39] Yu T, Eberly J H 2009 *Science* **323** 598
- [40] Almeida M P, Melo F D, Hor-Meyll M, Salles A, Walborn S P, Ribeiro P H S, Davidovich L 2007 *Science* **316** 579
- [41] Barbara M T 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 307
- [42] Duan L, Guo G 1999 *Phys. Lett. A* **255** 209
- [43] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801

A multifunctional quantum teleportation network^{*}

Zhou Yao-Yao^{1)†} Liu Yan-Hong¹⁾ Yan Zhi-Hui²⁾³⁾ Jia Xiao-Jun²⁾³⁾

¹⁾ (Department of Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China)

²⁾ (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

³⁾ (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 21 October 2020; revised manuscript received 4 December 2020)

Abstract

Quantum teleportation is one of the most basic quantum protocols, which transfers an unknown quantum state from one location to another through local operation and classical communication by using shared quantum entanglement without physical transfer of the information carrier. And it has been widely used in various quantum information protocols such as entanglement swapping, quantum repeaters, quantum gate teleportation, quantum computation based on measurement, and quantum teleportation networks, which have important application value in quantum computation and quantum information. Quantum teleportation is a naturally bipartite process, in which an unknown quantum state can only be transmitted from one node to another. With the further development of quantum information research, it is necessary to transfer quantum states or quantum information among more and more nodes. Multipartite quantum protocols are expected to form fundamental components for larger-scale quantum communication and computation. A bipartite quantum teleportation should be extended to a multipartite protocol known as a quantum teleportation network. In this paper, a multifunctional quantum teleportation network is proposed theoretically. We first propose a special method of constructing four-partite quantum resources in continuous variables (CVs), and based on this, construct two different types of CV quantum teleportation networks. One type of network contains just one quantum teleportation process consisting of a sender, a receiver and two controllers. In this type of network, the unknown quantum state can be recovered at any other node according to the requirement after the measurement in the input node, which enriches the transfer direction and transfer mode of the unknown quantum state. And meanwhile, the two controllers can control the transfer of a quantum state from the sender

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11804246, 11805141, 11904218, 12004276, 11847111, 61775127, 11654002), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFA0301402), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 201901D111293), the Program for the Outstanding Innovative Teams of Higher Learning Institutions of Shanxi, Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi, China (Grant Nos. 2019L0794, 2020L0516), the Program for Sanjin Scholars of Shanxi Province, the Fund for Shanxi “1331Project” Key Subjects Construction, China, the Program for the Outstanding Innovative Teams of Higher Learning Institutions of Shanxi, China and the “1331Program” of Taiyuan Normal University.

[†] Corresponding author. E-mail: zhouyaoyaofangxia@163.com

to the receiver by restricting the sender and receiver's access to their information, which makes the quantum teleportation network controllable. The other type of network has two quantum teleportation processes, each containing only a sender, a receiver and no controllers, which increases the number of quantum states that can be transmitted. Then we analyze the dependence of the fidelity of each quantum teleportation network on different physical parameters, and compare the characteristics, advantages and disadvantages among different types of quantum teleportation networks. The scheme for constructing a multifunctional quantum teleportation network in this paper shows some advantages, such as the greater number of quantum nodes, diversity of types, simple operation procedure. And all these advantages provide a broader application prospect for establishing larger and more complex quantum information networks in the future and quicken the pace of the application of quantum information.

Keywords: quantum teleportation network, controllability, multifunction, fidelity

PACS: 42.50.-p, 42.50.Ex, 42.50.Lc, 03.67.Hk

DOI: [10.7498/aps.70.20201749](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201749)