

激光与光电子学进展

基于部分记忆信道的量子隐形传态保真度增强方法研究

武天雄, 李云霞, 蒙文, 王俊辉, 魏家华*, 唐杰

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710000

摘要 量子保真度是量子隐形传态协议的重要评价参数之一, 可用于衡量传输初始态与输出态的相似程度。提出了一种利用部分记忆信道提高泡利噪声信道下隐形传态保真度的方法。依据不同的泡利信道噪声参数, 具体分析了比特翻转噪声、 xz 退相位噪声和双泡利噪声三种情况下的平均保真度。通过构造量子隐形传态方案的量子逻辑线路图, 分析了量子保真度与噪声参数的关系。针对噪声影响下的隐形传态过程, 引入了部分记忆信道, 并对部分记忆信道参数进行了分析。结果表明, 部分记忆信道可有效提高泡利噪声影响下量子隐形传态协议的保真度。

关键词 量子光学; 量子通信; 量子隐形传态; Bell态; 量子保真度; 泡利噪声; 记忆信道

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0527001

Enhancement of Quantum Teleportation Fidelity Based on Partial Memory Channel

Wu Tianxiong, Li Yunxia, Meng Wen, Wang Junhui, Wei Jiahua*, Tang Jie

Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract Quantum fidelity is one of the most important evaluation parameters in quantum teleportation protocols and can be used to evaluate the similarity between the initial state and the output state. Here, we propose one method to improve the teleportation fidelity in channels with Pauli noise based on a partial memory channel. According to the different parameters of Pauli noise, the average fidelity under three cases of bit-flip noise, xz dephasing noise, and two-Pauli noise is analyzed in detail. We construct the quantum logic circuit of a quantum teleportation scheme and analyze the relationship between quantum fidelity and noise parameters. In addition, as for the teleportation process under the effect of noise, the partial memory channel is introduced and the parameters of the partial memory channel are analyzed. The results show that the partial memory channel can effectively enhance the quantum teleportation fidelity under the influence of Pauli noise.

Key words quantum optics; quantum communication; quantum teleportation; Bell state; quantum fidelity; Pauli noise; memory channel

OCIS codes 270.5565; 270.5568; 270.5585

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-16; 录用日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61971436, 61803382)、中国博士后科学基金资助项目(2018M643869)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ6020)

*E-mail: weijiahua@126.com

1 引言

量子隐形传态是量子通信领域最引人注目的协议之一,其最初是由 Bennett 等^[1]在 1993 年提出的。作为纠缠资源^[2]的典型应用,关于隐形传态的理论和实验研究都受到了极大的关注^[3-12],人们逐渐拓展出多类型的隐形传态协议,如概率隐形传态^[3-5]、可控隐形传态^[6-8]、双向隐形传态^[9-10]等。

对于量子隐形传态而言,系统将不可避免地与环境发生相互作用,系统受到退相干影响,进而被传递信息失真。保真度作为表征量子通信传输效果的重要物理量之一,可用于描述系统初始态和输出态之间的相似程度。因此,提高传输过程中的保真度是量子隐形传态研究的重点方向之一。Oh 等^[13]通过求解 Lindblad 主方程,研究了噪声信道下隐形传态中的保真度变化。Qiu 等^[14]使用部分测量的方法,提高了隐形传态的保真度。Xu 等^[15]通过环境辅助纠缠恢复 (Environment-assisted entanglement restoration),较好地增强了隐形传态的保真度。Macchiavello 等^[16]在 2002 年提出了具有部分记忆的 Pauli 噪声信道模型。在部分记忆信道情况下,作用于两个子系统的噪声不能表示为两个作用于子系统的独立部分的张量积,噪声具有一定关联性,研究表明,部分记忆信道可用于改善噪声对系统的影响^[16]。Karpov 等^[17-18]推广了 Macchiavello 等^[16]的相关研究成果,通过引入描述相位相关性的参数,构造出具有任意维数的部分记忆信道。实际物理系统在连续操作中存在不同程度的关联特性^[19],尤其是当量子信道的传输速率较大时,记忆效应变得显著^[20-21]。量子记忆噪声信道引起了学者的高度重视^[22-24]。利用部分记忆信道增强量子隐形传态的保真度具有重要意义。

本文研究了泡利噪声信道对量子隐形传态性能的影响,通过引入部分记忆信道,提出了一种基于部分记忆信道的隐形传态保真度增强方法,通过选取合适的部分记忆参数,提高了泡利噪声影响下的隐形传态保真度。研究表明,通过引入部分记忆信道,可有效地改善比特翻转、 xz 退相位和双泡利噪声影响下的隐形传态,进而提高隐形传态的保真度。

2 泡利噪声信道下的量子隐形传态

2.1 理想情况下的隐形传态

为了便于文章阅读,本节将简要描述理想情况

下基于 Bell 态^[25-26]的量子隐形传态^[27]。假定初始 Bell 纠缠态的形式为

$$|\beta_{00}\rangle_{BC} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle), \quad (1)$$

同时,待传输的单量子比特态可设定为

$$|\psi_{in}\rangle_A = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}\exp(i\phi)|1\rangle, \quad (2)$$

式中: $|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \theta$ 为幅

值因子, $\theta \in [0, \pi]; \phi$ 为相位因子, $\phi \in [0, 2\pi)$ 。隐形传态可采用量子逻辑线路图来描述^[27],具体如图 1 所示。

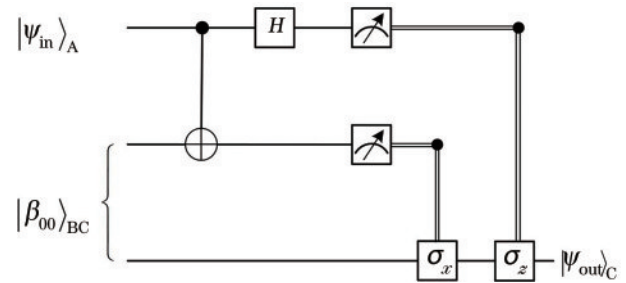


图 1 单比特量子隐形传态线路示意图^[27]

Fig. 1 Schematic of circuit for single-qubit quantum teleportation^[27]

在图 1 中,量子比特 A 和 B 属于发送者 Alice,量子比特 C 属于接收者 Bob, H 为对粒子 A 实施的 Hadamard 操作, $|\psi_{out}\rangle_C$ 为输出状态,“•”表示控制位,“ \oplus ”、“ σ_x ”、“ σ_z ”表示受控位所执行的酉操作, x 表示沿 x 轴自旋, z 表示沿 z 轴自旋。由图 1 可知, Bob 最终得到的状态可表示为

$$\rho_{out} = \text{Tr}_{A,B}(U_{tel} \rho_{source} U_{tel}^\dagger), \quad (3)$$

式中: ρ_{source} 为纠缠源的密度矩阵, $\rho_{source} = |\psi_{in}\rangle_A \langle\psi_{in}| \otimes |\beta_{00}\rangle_{BC} \langle\beta_{00}|$, 其中 $|\psi_{in}\rangle$ 为目标状态, \otimes 为张量积, $|\beta_{00}\rangle$ 为 Bell 态; $\text{Tr}_{A,B}$ 为对量子比特 A、B 求偏迹; U_{tel} 为酉操作矩阵, $U_{tel} = (\sigma_z)_{A \rightarrow C} (\sigma_x)_{B \rightarrow C} H(\sigma_x)_{A \rightarrow B}$, 其中酉操作 $(\sigma_\lambda)_{n \rightarrow m}$ 为两比特的受控酉操作, n 为控制比特, m 为目标比特, $\lambda = x, z, n = A, B, m = B, C$; U_{tel}^\dagger 为 U_{tel} 的共轭转置矩阵。如图 1 所示,根据粒子 A 和 B 的测量结果, Bob 将对其所持有的粒子 C 进行相应的酉操作 $(\sigma_\lambda)_{n \rightarrow m}$, 进而实现量子态的隐形传输。在理想环境下,即在没有噪声的环境下,系统输入态与输出态

完全一致,此时的传输成功率为 1。

2.2 泡利噪声信道下的隐形传态

在实际物理系统中,量子隐形传态会与周围环境发生相互作用。因此,研究噪声环境下的隐形传态具有重要意义。假设 Charlie 事先制备两粒子 Bell 态 $|\beta_{00}\rangle_{BC}$, 并将粒子 B 发送给 Alice, 将粒子 C 发送给 Bob。设想粒子 B 和 C 在环境中均独立受到泡利噪声的影响, 经过传输后整体系统将演化为

$$\mathcal{E}(\rho_{\text{source}}) = \sum_{i,j=0}^3 p_i p_j \sigma_{ij} \rho_{\text{source}} \sigma_{ij}, \quad (4)$$

式中: p_0 为粒子不作任何旋转的概率; p_1 为粒子沿 x 轴旋转的概率; p_2 为粒子沿 y 轴旋转的概率; p_3 为粒子沿 z 轴旋转的概率, 且 $\sum_{i=0}^3 p_i = \sum_{j=0}^3 p_j = 1$; σ_{ij} 为两粒子泡利噪声, $\sigma_{ij} = \sigma_i \otimes \sigma_j$, 其中 σ_i 和 σ_j 分别为两个量子比特所受到的泡利噪声。相应泡利噪声^[27]可表示为

$$\begin{cases} \sigma_0 = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \\ \sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

在噪声环境中, (3) 式则表示为

$$\rho_{\text{out}} = \text{Tr}_{A,B} [U_{\text{tel}} \mathcal{E}(\rho_{\text{source}}) U_{\text{tel}}^\dagger] \quad (6)$$

可采用保真度来评估隐形传态的传输质量, 保真度可有效量化目标状态 $\rho_{\text{in}} = |\psi\rangle\langle\psi|$ 和输出状态 ρ_{out} 之间的差异, 其可表示^[27]为

$$F = \langle\psi|\rho_{\text{out}}|\psi\rangle, \quad (7)$$

式中: $|\psi\rangle$ 为输入态; $\langle\psi|$ 为输入状态的共轭转置。保真度的计算结果范围为 $[0, 1]$, 保真度 $F = 1$ 表示输出态与待传输的目标状态一致, 保真度 $F = 0$ 表示两状态相互正交。一般情况下, 对于任意量子态而言, 可利用平均保真度表征统计特性。平均保真度^[24]可表示为

$$F_{\text{av}} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin\theta F(\theta, \phi). \quad (8)$$

当隐形传态系统不考虑噪声影响时, 系统处于理想状态, 输出状态与目标状态完全一致, 此时保真度与平均保真度均为 1。

3 引入部分记忆信道的量子隐形传态

3.1 部分记忆信道

在泡利噪声的影响下, 有记忆特性的量子态演化^[15]可表示为

$$\mathcal{E}(\rho_{\text{source}}) = \sum_{i,j=0}^3 p_{ij} \sigma_{ij} \rho_{\text{source}} \sigma_{ij}, \quad (9)$$

式中: p_{ij} 是二维概率分布, 被定义^[15]为

$$p_{ij} = (1 - \mu) p_i p_j + \mu p_i \delta_{ij}, \quad (10)$$

式中: 当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$; $\mu (0 \leq \mu \leq 1)$ 为对粒子 B 和 C 施加相同旋转的概率, 可用于量化一个信道在使用过程中的内存量^[16]。当 $\mu = 0$ 时, 每个粒子独立通过泡利噪声信道, 信道衰减为无记忆的泡利噪声信道, 此时(9)式与(4)式相同, 隐形传态过程中的粒子均独立受到噪声影响; $\mu = 1$ 表示粒子完全关联, 此时粒子受到的噪声影响一致; $0 < \mu < 1$ 则表示引入部分记忆信道, 此时粒子受到的噪声影响既有相同部分又有不同部分。将(9)式代入(8)式, 可得到引入部分记忆信道后泡利噪声影响下的隐形传态平均保真度, 即

$$F_{\text{av}} = \frac{2a(1-\mu)}{3} + b\mu + c(1-\mu), \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = p_0 p_1 + p_0 p_2 + p_0 p_3 + p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3 \\ b = p_0 + p_1 + p_2 + p_3 \\ c = p_0^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 \end{cases} \quad (12)$$

当 $\mu = 0$ 时, 可得到 $F_{\text{av}} = \frac{2a}{3} + c$, 此即为未引入部分记忆信道时隐形传态系统在泡利噪声影响下的平均保真度。

3.2 通过部分记忆信道增强隐形传态的保真度

3.2.1 比特翻转噪声

当(12)式中的概率参数为 $p_0 = 1 - p$, $p_1 = p$ 和 $p_2 = p_3 = 0$ 时, 表示只有 σ_0 和 σ_1 作用于量子态, 其中 σ_0 是单位矩阵, 对量子态没有实质影响, σ_1 可使粒子翻转, 参数 p 表示量子态 $|0\rangle$ 翻转为 $|1\rangle$ 或 $|1\rangle$ 翻转为 $|0\rangle$ 的概率, 此时泡利噪声具体表现为比特翻转噪声^[27]。因此, (11) 式可重新表述为

$$F_{\text{av}} = \frac{4p^2(1-\mu)}{3} + \frac{4p(\mu-1)}{3} + 1. \quad (13)$$

当 $\mu = 0$ 时, 即未引入部分记忆信道时, 量子隐形传态过程中的纠缠粒子独立受到比特翻转噪声

的影响,相应平均保真度可表示为 $F_{av} = \frac{4p^2}{3} - \frac{4p}{3} + 1$ 。引入记忆信道后,平均保真度如(13)式所示,当噪声概率相同时, $\frac{4p^2(1-\mu)}{3} + \frac{4p(\mu-1)}{3} + 1 \geq \frac{4p^2}{3} - \frac{4p}{3} + 1$,所以引入记忆信道可增强保真度。在比特翻转噪声的影响下,引入部分记忆信道的隐形传态平均保真度随参数 μ 和 p 的变化如图 2 所示。

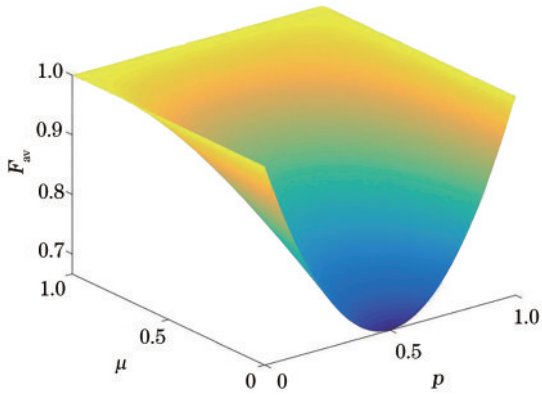


图 2 比特翻转噪声影响下 F_{av} 随 μ 和 p 的变化

Fig. 2 F_{av} versus μ and p under influence of bit-flip noise

对于未引入记忆信道的隐形传态而言,即 $\mu=0$,量子隐形传态受到比特翻转噪声的影响,平均保真度会在噪声概率为 0.5 时取得最小值,此时传输效果最差。而当噪声概率为 0 和 1 时,平均保真度均为 1。这是因为所选用的 Bell 态作为纠缠通道时所具有的特殊性,即 $(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|11\rangle + |00\rangle)$ 。在引入记忆信道后,平均保真度有明显提升,尤其是当 $\mu=1$ 时,无论噪声概率 p 为多少,平均保真度均可达到 1。

3.2.2 xz 退相位噪声

当(12)式中的概率参数为 $p_0 = (1-p)^2, p_1 = p_3 = p - p^2$ 和 $p_2 = p^2$ 时,泡利噪声具体表现为 xz 退相位噪声,此噪声可实现概率为 p 的 x 方向退相位和概率为 $1-p$ 的 z 方向退相位^[28],此时平均保真度表示为

$$F_{av} = \frac{8p(\mu-1)}{3} + \frac{16p^2(1-\mu)}{3} + \frac{16p^3(\mu-1)}{3} + \frac{8p^4(1-\mu)}{3} + 1. \quad (14)$$

当 $\mu=0$ 时,即未引入部分记忆信道,平均保真度可表示为 $F_{av} = -\frac{8p}{3} + \frac{16p^2}{3} - \frac{16p^3}{3} + \frac{8p^4}{3} + 1$ 。引入部分记忆信道后,平均保真度如(14)式所示,当噪声概率相同时, $\frac{8p(\mu-1)}{3} + \frac{16p^2(1-\mu)}{3} + \frac{16p^3(\mu-1)}{3} + \frac{8p^4(1-\mu)}{3} + 1 \geq -\frac{8p}{3} + \frac{16p^2}{3} - \frac{16p^3}{3} + \frac{8p^4}{3} + 1$,因此引入记忆信道可增强保真度。在 xz 退相位噪声影响下,引入部分记忆信道的隐形传态平均保真度随参数 μ 和 p 的变化如图 3 所示。

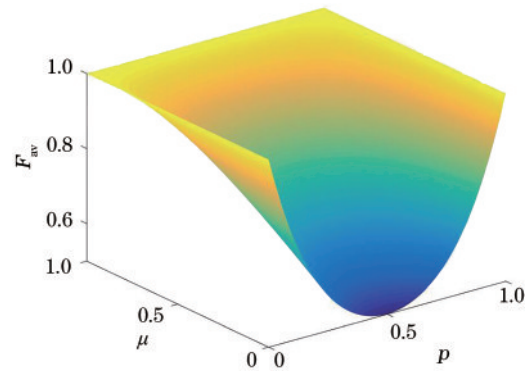


图 3 xz 退相位噪声影响下 F_{av} 随 μ 和 p 的变化

Fig. 3 F_{av} versus μ and p under influence of xz dephasing noise

与比特翻转噪声类似,对于未引入记忆信道的隐形传态($\mu=0$),受 xz 退相位噪声的影响,平均保真度会在噪声概率为 0.5 时取得最小值,传输效果最差。与此同时, xz 退相位噪声对隐形传态的影响较比特翻转噪声的影响更大,会使平均保真度降低到更低值。在引入记忆信道后,平均保真度随着参数 μ 的增加而提高,且当 $\mu=1$ 时,平均保真度可达到 1。

3.2.3 双泡利噪声

当(12)式中的概率参数为 $p_0 = 1-p, p_1 = p_3 = p/2$ 和 $p_2 = 0$ 时,只有 σ_0, σ_1 和 σ_3 对量子态有影响,此时泡利噪声表现为双泡利噪声(Two-Pauli noise),在此噪声下量子态不受影响的概率为 $1-p$,且两个 Pauli 旋转(σ_0, σ_3)中的一个以概率 p 随机地作用于粒子^[29]。此时,(11)式可表示为

$$F_{av} = \frac{4p(\mu-1)}{3} + p^2(1-\mu) + 1. \quad (15)$$

当 $\mu=0$ 时,即未引入部分记忆信道,平均保真度可

表示为 $F_{av} = -\frac{4p}{3} + p^2 + 1$ 。引入记忆信道后,平均保真度如(15)式所示,当噪声概率相同时, $\frac{4p(\mu-1)}{3} + p^2(1-\mu) + 1 \geq -\frac{4p}{3} + p^2 + 1$, 所以引入记忆信道可增强保真度。在双泡利噪声的影响下,引入部分记忆信道的隐形传态平均保真度随参数 μ 和 p 的变化如图 4 所示。

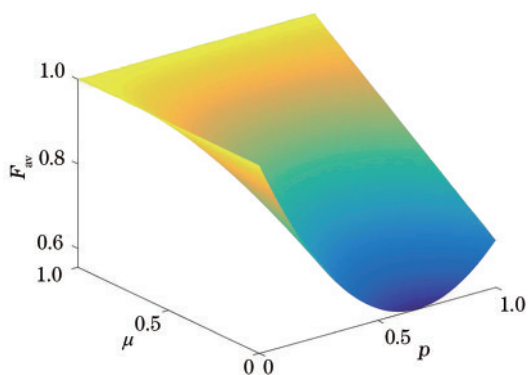


图 4 双泡利噪声影响下 F_{av} 随 μ 和 p 的变化

Fig. 4 F_{av} versus μ and p under influence of two-Pauli noise

对于未引入记忆信道的隐形传态($\mu=0$),在双泡利噪声的影响下,平均保真度会在噪声概率为 $2/3$ 时取得最小值。在引入记忆信道后,平均保真度有明显提升,且随着相关参数 μ 的增加而增加,特别是当 $\mu=1$ 时,平均保真度可达到 1。

4 结 论

量子隐形传态是量子通信领域的重要研究方向,保真度是衡量隐形传态系统性能的重要指标。受制于环境噪声的影响,实际的量子物理系统会产生退相干效应。针对比特翻转噪声、 xz 退相位噪声和双泡利噪声,提出了一种基于部分记忆信道的隐形传态保真度增强方法。研究表明,对于受比特翻转或 xz 退相位噪声影响的隐形传态,平均保真度会在噪声概率为 $1/2$ 时取得最小值,在引入部分记忆信道后,隐形传态的平均保真度得以增强,且随着记忆参数 μ 的增加,平均保真度逐渐上升,当 $\mu=1$ 时,不论噪声参数为多少,平均保真度均为 1; 对于受双泡利噪声影响的隐形传态,平均保真度会在噪声概率为 $2/3$ 时取得最小值,当引入记忆信道后,平均保真度会随着记忆参数 μ 的增加而上升,且当 $\mu=1$ 时,可实现信息的无失真传输。目前,隐形传态的研究工作主要集中于协议设计与优化,如概率隐形传态和可控隐形传态等,关于噪声环境下隐

形传态性能的分析相对较少。针对“量子隐形传态过程会受到环境噪声的影响”这一实际情况,研究了一种利用部分记忆信道增强泡利噪声信道下隐形传态保真度的方法,相应研究成果对于隐形传态的实验研究具有一定的参考价值。为了便于理解分析,选取了最为经典的单比特量子态的隐形传态进行分析,相关研究结果可推广至多比特隐形传态和受控隐形传态等不同类型协议中,此为下一步的工作内容之一。

参 考 文 献

- [1] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels [J]. Physical Review Letters, 1993, 70 (13): 1895-1899.
- [2] Lu F. Controllable quantum entanglement based on cavity structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 042701. 陆繁. 基于腔结构的可控量子纠缠[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 042701.
- [3] Li W L, Li C F, Guo G C. Probabilistic teleportation and entanglement matching [J]. Physical Review A, 2000, 61(3): 034301.
- [4] Chen X B, Du J Z, Wen Q Y, et al. Probabilistic teleportation of multi-particle partially entangled state [J]. Chinese Physics B, 2008, 17(3): 771-777.
- [5] Yan F L, Yan T. Probabilistic teleportation via a non-maximally entangled GHZ state [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(10): 902-906.
- [6] Zhou P, Li X H, Deng F G, et al. Multiparty-controlled teleportation of an arbitrary m -qudit state with a pure entangled quantum channel [J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2007, 40(43): 13121-13130.
- [7] Man Z X, Xia Y J, An N B. Genuine multiqubit entanglement and controlled teleportation [J]. Physical Review A, 2007, 75(5): 052306.
- [8] Han X P, Liu J M. Amplitude damping effects on controlled teleportation of a qubit by a tripartite W state [J]. Physica Scripta, 2008, 78(1): 015001.
- [9] Zha X W, Zou Z C, Qi J X, et al. Bidirectional quantum controlled teleportation via five-qubit cluster state [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2013, 52(6): 1740-1744.
- [10] Li Y H, Nie L P. Bidirectional controlled teleportation by using a five-qubit composite GHZ-

- Bell state [J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 2013, 52(5): 1630-1634.
- [11] Bouwmeester D, Mattle K, Pan J W, et al. Experimental quantum teleportation of arbitrary quantum states [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1998, 67(6): 749-752.
- [12] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 70-73.
- [13] Oh S, Lee S, Lee H W. Fidelity of quantum teleportation through noisy channels [J]. *Physical Review A*, 2002, 66(2): 022316.
- [14] Qiu L, Tang G, Yang X Q, et al. Enhancing teleportation fidelity by means of weak measurements or reversal [J]. *Annals of Physics*, 2014, 350: 137-145.
- [15] Xu X M, Cheng L Y, Liu A, et al. Environment-assisted entanglement restoration and improvement of the fidelity for quantum teleportation [J]. *Quantum Information Processing*, 2015, 14(11): 4147-4162.
- [16] Macchiavello C, Palma G M. Entanglement-enhanced information transmission over a quantum channel with correlated noise [J]. *Physical Review A*, 2002, 65(5): 050301.
- [17] Karpov E, Daems D, Cerf N J. Entanglement-enhanced classical capacity of quantum communication channels with memory in arbitrary dimensions [J]. *Physical Review A*, 2006, 74(3): 032320.
- [18] Karimipour V, Memarzadeh L. Transition behavior in the capacity of correlated noisy channels in arbitrary dimensions [J]. *Physical Review A*, 2006, 74(3): 032332.
- [19] Zhang R, Liu W T, Wang J, et al. Entanglement in quasi-periodic evolution of quantum walks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 182701.
张融, 刘文婷, 王杰, 等. 准周期演化量子行走中的纠缠关联 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 182701.
- [20] D'Arrigo A, Benenti G, Falci G. Quantum capacity of dephasing channels with memory [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(9): 310.
- [21] D'Arrigo A, Benenti G, Falci G, et al. Classical and quantum capacities of a fully correlated amplitude damping channel [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 042337.
- [22] Arshed N, Toor A H. Entanglement-assisted classical capacity of quantum channels with correlated noise [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(1): 014304.
- [23] Benenti G, D'Arrigo A, Falci G. Enhancement of transmission rates in quantum memory channels with damping [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(2): 020502.
- [24] Zhang Z H, Sun M. Enhanced deterministic joint remote state preparation under Pauli channels with memory [J]. *Physica Scripta*, 2020, 95(5): 055107.
- [25] Lin J. Preparing bell state by using dissipative process in directly coupled cavities [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 242703.
林杰. 直接耦合腔中通过耗散通道制备 Bell 态 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 242703.
- [26] Zhai S Q, Yuan N, Li Q. Asymmetric bipartite EPR steering swapping characteristics of continuous variable [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0427001.
翟淑琴, 袁楠, 李倩. 连续变量两组分非对称 EPR 导引交换特性 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0427001.
- [27] Nielsen M, Chuang I. *Quantum computation and quantum information* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [28] Leditzky F, Leung D, Smith G. Quantum and private capacities of low-noise channels [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(16): 160503.
- [29] Bausch J, Leditzky F. Error thresholds for arbitrary Pauli noise [EB/OL]. (2019-10-01) [2020-04-17]. <https://arxiv.org/abs/1910.00471>.