



量子直接传态

王明宇 王馨德 阮东 龙桂鲁

Quantum direct portation

Wang Ming-Yu Wang Xin-De Ruan Dong Long Gui-Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 190301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210837

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210837>

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Bell态粒子和单光子混合的量子安全直接通信方案的信息泄露问题

Information leakage problem in quantum secure direct communication protocol based on the mixture of Bell state particles and single photons

物理学报. 2017, 66(13): 130304 <https://doi.org/10.7498/aps.66.130304>

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>

基于cluster态的信道容量可控的可控量子安全直接通信方案

Cluster state based controlled quantum secure direct communication protocol with controllable channel capacity

物理学报. 2017, 66(18): 180303 <https://doi.org/10.7498/aps.66.180303>

多功能量子远程传态网络

A multifunctional quantum teleportation network

物理学报. 2021, 70(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201749>

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>

基于光量子态避错及容错传输的量子通信

Quantum error rejection and fault tolerant quantum communication

物理学报. 2018, 67(13): 130301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180598>

量子直接传态*

王明宇¹⁾²⁾ 王馨德³⁾ 阮东¹⁾²⁾ 龙桂鲁^{1)2)4)†}

1) (清华大学物理系, 低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084)

2) (清华大学教育部量子信息前沿科学中心, 北京 100084)

3) (青岛大学物理科学学院, 青岛 266071)

4) (北京量子信息科学研究院, 北京 100193)

(2021年5月2日收到; 2021年5月24日收到修改稿)

把一个任意量子态在既有噪声又有窃听的信道下安全可靠地传输, 是一个广泛而重要的问题. 现在已有的方法是先传输大量的 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠对, 然后进行纠缠纯化, 获得一对近似完美的纠缠对, 再进行隐形传态或者远程态制备来传输量子态. 本文给出一种直接安全传输量子态的方法, 通过量子直接通信, 安全地传输大量同样的任意量子态, 然后利用单量子态的纯化方法, 得到一个近于完美的量子态. 这是一种不需要量子纠缠的量子态安全传输方法, 避免使用纠缠资源. 这种方案是量子隐形传态和远程态制备之外的又一途径. 此外, 这一方案将原来只是用来传输经典信息的量子安全直接通信扩展到传输任意量子态的新领域, 扩大了量子直接通信的用途. 这一方案将在未来量子互联网中有重要的应用.

关键词: 量子直接传态, 量子安全直接通信, 量子安全直接态传输, 单量子比特纯化

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Dd

DOI: 10.7498/aps.70.20210837

1 引言

在量子信息中, 量子态的安全、可靠和高效传输具有广泛和重要的应用. 通过传输量子态, 量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD)^[1–10] 可以进行安全的密钥协商, 量子安全直接通信 (quantum secure direct communication, QSDC)^[11–31] 可直接安全地传输信息^[32–43]. 在这些量子技术中, 所协商的密钥或者传输的信息是经典的.

有时候还需要安全地传输一个任意量子态. 这时候要满足两个要求, 一个是要安全, 即量子态不被窃听者获得, 另一个是要可靠, 即要保真地传输量子态. 现在通常利用纠缠态、纠缠纯化和量子隐

形传态 (quantum teleportation, QT) 或远程态制备 (remote state preparation, RSP) 来实现^[44–48]. 具体方法是, 首先纠缠分发大量的已知纠缠态, 之后利用纠缠纯化得到一个好量子纠缠态. 如果是要传输已知的量子态, 则可以用远程量子态制备的方法, 或者是利用量子隐形传态. 如果所传输的量子态是未知的, 则要使用量子隐形传态. 在量子隐形传态中, 携带所传输量子态的粒子本身并没有被传输. 量子态的传输有广泛应用, 如分布式量子计算^[49–59] 可以实现不同地点的量子计算机重组和算力倍增, 实现单个量子计算机无法实现的任务.

量子态在传输过程中会受到环境的影响, 出现退相干. 而受不可克隆定理限制, 量子态无法进行放大. 为了解决这一问题, 一个广泛采用的方法是

* 国家自然科学基金 (批准号: 11974205)、国家高技术研究发展计划 (863 计划)(批准号: 2011AA06Z228)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2017YFA0303700)、广东省重点研发领域研发计划 (批准号: 2018B030325002) 和北京未来高精尖芯片中心资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gllong@tsinghua.edu.cn

量子中继^[60], 其核心思想是: 利用中继节点将信道分割成许多小段, 并结合级联的纠缠交换技术, 构建一条发送方至接收方的具有高保真度的量子纠缠信道. 而后, 则可利用量子隐形传态^[61]来实现信息的发送^[62]. 在量子隐形传态中, 发送方和接收方需要预先分发共享大量的纠缠态, 随后, 再从受到环境影响的纠缠态中纯化^[63]出一个高质量的纠缠态, 在此基础上, 双方通过局域量子操作和经典通信, 可以在不传送携带信息的实物粒子的条件下, 实现未知量子态的远程制备, 具有极高的安全性. 而对于已知的量子态, 除了使用量子隐形传态来传输外, 还可以使用量子远程态制备来实现安全传输. Lo^[64], Pati^[65]和 Bennett 等^[66]提出的远程量子态制备的方案, 利用纠缠态的性质, 在不传输实物粒子本身的条件下将已知量子态传输给接收方. 量子隐形传态和远程态制备都使用了纠缠态, 后者需要量子态是已知的, 是前者的弱化版, 因而所需要的量子操作和经典通信资源大幅降低. 在许多量子信息应用中, 传输的量子态是已知的, 具有广泛的应用场景. 纠缠是量子力学特有的资源, 但在实际应用中, 其制备和测量较单个粒子的量子态困难许多. 此外, 作为一种独立于这两种已知的方法, 直接安全传输量子态也有重要的应用. 本文提出的量子直接态传输完成的是和远程量子态制备一样的任务.

单粒子量子态在传输过程中也会因信道的影响而退化, 但也可以纯化. 1999年, Cirac 等^[67]提出了单比特量子态纯化的方法. 如果有大量相同的量子态经过相同的噪声环境后引起量子态的退化, 可以应用这一方法进行纯化, 得到高质量单比特量子态. 2004年, 这一方案首次在光学系统的实验上得到了演示^[68]; 2014年, 这一方案又在核磁共振系统的实验上得到了演示^[69]. 对于已知的单比特量子态, 我们可以采用和经典放大类似的方法, 传输大量的量子态, 然后对传输后的量子态进行单比特量子态纯化, 这样也能实现已知任意量子态的高保真传输. 但是, 简单地传输量子态会被窃听者 Eve 截获, 经过多次测量, Eve 可以完全获得量子态. 因此, 单比特量子态的简单传输虽然解决了可靠传输的问题, 但无法满足安全传输的要求.

而量子安全直接通信^[11]能够在量子信道直接安全地传输经典信息, 将噪声信道下的可靠传输信息的经典通信发展为在既有噪声又有窃听信道下

的安全和可靠传输信息的量子通信. 经过 20 多年的发展, QSDC 逐渐得到重视, 成为国际的研究前沿热点. 2016年, 清华大学和山西大学合作团队完成了在噪声信道下的单光子 DL04 方案的实验演示^[17], 在国际上首次证明了在有丢码和错码的情况下可以进行量子安全直接通信. 2017年, 中科大、南京邮电大学和清华大学合作完成了高效方案和两步方案的原理演示^[19,20]. 2019年, 清华大学团队成功研制了国际上首个实用化的 QSDC 样机^[23], 该系统能够在量子信道中直接传输文本、图片等文件, 并能够进行语音通话, 最新的系统可以实现 10 km 光纤 4 kbps 的传输速率^[24]. 虽然 QSDC 能够实现已知量子态的安全传输, 但是, 其所传输的是已知的经典信息的量子态, 即表示 0 或 1 的量子态, 不是一个已知的任意单量子态. QSDC 并不能直接应用到任意量子态的安全传输.

我们将发展 QSDC 的方法, 将其从安全直接传输经典信息的量子态发展为安全直接传输已知的任意单比特量子态. 与单比特态纯化相结合, 实现量子态的安全和可靠传输. 这一方法一方面减免了 EPR 纠缠态的使用, 另外也提供了任意量子态安全传输的第三种方式.

本文将首先介绍基于单光子的 DL04 量子安全直接通信方案, 然后给出量子直接传态方案, 最后我们给出讨论和结论.

2 DL04 量子安全直接通信方案

基于单光子的 DL04 方案^[13]是 QSDC 的典型协议, 其具体步骤如下所述.

步骤 1 接收方 Bob 制备一个单光子序列 A , 并将其发送给发送方 Alice. 序列 A 中的每一个单光子随机地处于 4 个量子态 $\{|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle\}$ 之一. 其中, $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 为 σ_z 的本征态, $|+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 为 σ_x 的本征态,

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \quad (1a)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle). \quad (1b)$$

步骤 2 Alice 在接收到单光子序列 A 后, 随机地选择部分光子, 构成序列 S , 用于窃听检测, 其余的光子构成序列 B . 窃听检测的具体方法如下所述.

Alice 对序列 S 中的每个单光子进行正交投影测量, 每个单光子的测量基随机地从 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 和 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 中选择. Alice 将序列 S 中的单光子在序列 A 中的位置、选择的单光子测量基以及测量结果告知 Bob, 双方据此估计误码率. 如果误码率低于阈值, 则进行下一步; 否则, 放弃本次光子的传输.

步骤 3 Alice 使用么正操作 U_0 和 U_1 , 对序列 B 中的单光子进行信息编码, 并将其发送给 Bob. U_0 和 U_1 分别用于编码经典信息比特 0 和 1, 具体形式为

$$U_0 = |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|, \quad (2a)$$

$$U_1 = |0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0|. \quad (2b)$$

编码的信息包含要传机密信息和误码检测信息, 后者通过在序列 B 中随机挑选一部分光子编码随机数进行实现, 用于估算第二次传输的误码率.

步骤 4 Bob 接收到 Alice 传输来的光子后, 根据自己先前制备量子态的基矢信息, 测量量子态, 读出 Alice 编码的经典信息. Alice 公布编码随机数光子的位置, 双方估计出第二次传输的误码率, 从而确认通信是否成功.

由上面讨论可见, 这里传输的量子态携带的是经典信息 0 或 1, 用这一方法不能传输形如 $|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ 的任意量子态.

3 量子直接传态方案

我们在 DL04 方案的基础上, 提出了一种通过量子信道直接传输单比特量子态的方案, 称之为量子直接传态 (quantum direct portation, QDP). 一般单比特量子态的形式为

$$|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad (3)$$

其中, $a \in R, b \in C, |a|^2 + |b|^2 = 1$. 取 $a = \cos\frac{\theta}{2}$, $b = e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}$, 其中, $\theta \in [0, \pi], \phi \in [0, 2\pi]$, 则单比特量子态可用半径为 1 的球面上的点 $(1, \phi, \theta)$ 表示, 即 Bloch 球表示.

假设 Alice 欲将一个已知的单比特量子态通过量子信道直接传输给 Bob, 沿用 DL04 方案的思想, 首先, Bob 制备一个单光子序列 A , 并将其发送给 Alice. 序列 A 中的每一个单光子随机地处于 4 个量子态 $\{|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle\}$ 之一. Alice 接收到

单光子序列 A 后, 随机地选择两小部分光子, 分别构成序列 S_1 和 S_2 , 其余的光子构成序列 B , $B = A - S_1 - S_2$. 序列 S_1 用于第一次窃听检测, 序列 S_2 用于第二次窃听检测, 序列 B 用于传输单比特量子态, 具体步骤如下所述.

Alice 对序列 S_1 中的每个单光子进行正交投影测量, 每个单光子的测量基随机地从 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 和 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 中选择. 随后, Alice 将序列 S_1, S_2 中的单光子在序列 A 中的位置、序列 S_1 选择的单光子测量基及测量结果告知 Bob, 双方据此估计第一次传输的误码率. 如果误码率低于阈值, 则进行下一步; 否则, 放弃本次光子的传输. 确认量子信道安全后, Alice 使用么正操作 U_φ 作用于序列 B 中的全部单光子, 并将序列 B 和 S_2 传输给 Bob. 其中,

$$U_\varphi = \begin{pmatrix} a & -b^* \\ b & a \end{pmatrix}. \quad (4)$$

U_φ 操作前后, 序列 B 中单光子量子态变化的对应关系如表 1 所示.

表 1 U_φ 操作前后序列 B 中的单光子态 (传输任意已知单比特量子态)

Table 1. Single photon states in sequence B before and after U_φ operation in the case of transmitting arbitrary known single qubit.

U_φ 操作前	U_φ 操作后
$ 0\rangle$	$a 0\rangle + b 1\rangle$
$ 1\rangle$	$-b^* 0\rangle + a 1\rangle$
$ +\rangle$	$(1/\sqrt{2})[(a - b^*) 0\rangle + (a + b) 1\rangle]$
$ -\rangle$	$(1/\sqrt{2})[(a + b^*) 0\rangle + (b - a) 1\rangle]$

Bob 在接收到单光子序列 S_2 以及 Alice 进行 U_φ 操作后的单光子序列 B 后, 他根据自己先前制备序列 A 量子态的信息, 首先对序列 S_2 中的单光子进行测量, 计算第二次传输的误码率, 从而确认第二次传输是否被窃听. 如果误码率不超过阈值, 说明窃听不严重. 此时, Bob 可保留序列 B 中 U_φ 操作前为 $|0\rangle$ 的单光子态, 再对这些量子态进行单量子态纯化操作, 从而得到一个近似完美的待传单光子态. 而序列 B 中, $|1\rangle, |+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 经过 U_φ 操作后对应的态, Bob 无法通过局域量子操作将其复原为 (3) 式中要传输的量子态, 故舍弃. 忽略序列 S_1 和 S_2 中的少部分单光子, 效率为 25%, 舍弃的单光子是为了安全传输任意量子态的代价.

有两种特殊的单比特量子态需要讨论, 赤道态和实系数态. 赤道态的形式为

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle), \quad (5)$$

对应 Bloch 球“赤道圈”上的点 $(1, \phi, \frac{\pi}{2})$. 若要传输的量子态为赤道态, 一种方法是采用上面的普遍方法, 效率为 25%. 但我们可以采用另外的方式, 可将其效率提高一倍. 此时我们取 $U_\varphi = R_z(\phi)$, 即单量子位门中的相移门, 具体形式为

$$R_z(\phi) = |0\rangle\langle 0| + e^{i\phi}|1\rangle\langle 1|. \quad (6)$$

Bob 可根据自己先前制备序列 A 量子态的信息, 保留序列 B 中 U_φ 操作前为 $|+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 的单光子态, 并分别利用单量子位门 $I = |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|$ 和 $Z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|$, 将它们复原为形如 (5) 式的赤道态. U_φ 操作前后, 序列 B 中的单光子态变化及 Bob 操作选用的具体对应关系如表 2 所示.

表 2 U_φ 操作前后序列 B 中的单光子态和 Bob 采用的操作 (传输赤道态)

Table 2. Single photon states in sequence B before and after U_φ operation in the case of transmitting equatorial state & Bob's related operations.

U_φ 操作前	U_φ 操作后	Bob 采用的操作
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	舍弃
$ 1\rangle$	$e^{i\phi} 1\rangle$	舍弃
$ +\rangle$	$(1/\sqrt{2})(0\rangle + e^{i\phi} 1\rangle)$	I
$ -\rangle$	$(1/\sqrt{2})(0\rangle - e^{i\phi} 1\rangle)$	Z

当 (3) 式中的系数 a 和 b 为实数时, 对应 Bloch 球面与 $x-z$ 平面所截球大圆上的点 $(1, 0, \theta) \cup (1, \pi, \theta)$, 我们可以形象地将其看作是 Bloch 球上“ 0° 经线”和“ 180° 经线”所组成的经线圈. 若要传输的量子态为实系数态, 采用前面的普遍方法, 此时 U_φ 退化为

$$U_\varphi = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Bob 可保留序列 B 中的所有单光子态, 并根据自己先前制备序列 A 量子态的信息, 分别采用局域量子操作 I, Y, ZH 和 XH , 将序列 B 中所有单光子态复原为要传输的实系数态. 其中

$$I = |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|, \quad (8)$$

$$X = |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|, \quad (9)$$

$$Y = |0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0|, \quad (10)$$

$$Z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|, \quad (11)$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} [(|0\rangle + |1\rangle)\langle 0| + (|0\rangle - |1\rangle)\langle 1|]. \quad (12)$$

U_φ 操作前后, 序列 B 中的单光子态变化以及 Bob 操作选用的具体对应关系如表 3 所示.

表 3 U_φ 操作前后序列 B 中的单光子态和 Bob 采用的操作 (传输实系数态)

Table 3. Single photon states in sequence B before and after U_φ operation in the case of transmitting real-coefficient state & Bob's related operations.

U_φ 操作前	U_φ 操作后	Bob 采用的操作
$ 0\rangle$	$a 0\rangle + b 1\rangle$	I
$ 1\rangle$	$-b 0\rangle + a 1\rangle$	Y
$ +\rangle$	$(1/\sqrt{2})[(a-b) 0\rangle + (a+b) 1\rangle]$	ZH
$ -\rangle$	$(1/\sqrt{2})[(a+b) 0\rangle + (b-a) 1\rangle]$	XH

4 讨论与结论

本文提出的量子直接传态方案发展了量子安全直接通信协议, 将在量子信道下安全传输表示经典信息的量子态发展为安全可靠直接传输任意已知单比特量子态. 我们给出了普遍的方案, 并对两种特殊情况进行了讨论, 即赤道态和实系数态. 结果表明, 对于已知任意单比特量子态, 本方案的效率为 25%; 对于赤道态, 通过选取特定的 U_φ 操作, 其效率可达到 50%; 对于实系数态, 接收方根据自己先前制备量子态的信息, 采用相应的局域量子操作, 可将接收到的所有单光子态复原为发送方要传输的态, 效率为 100%. 对于传输已知的任意单比特量子态和赤道态, 其中所舍弃的单光子是为了确保量子信道的安全所产生的代价. 即便如此, 本方案依然能够实现确定性的量子态传输. 量子隐形传态和远程量子态制备通过一轮光子的传输实现纠缠分发, 而量子直接传态采用两轮光子的传输, 避免了纠缠信道的使用, 其中所涉及到的量子操作在实验上较易实现, 如么正操作 U_φ (可通过线性光学元件实现)、单量子位门等, 无需纠缠制备和 Bell 基测量等复杂量子操作, 具有较好的实用性. 本方案通过量子直接通信, 直接安全地传输大量的单比特量子态以便进行量子态纯化, 获得高质量的单比特量子态. 如果是联合噪声, 还可以采用避错的方法解决 [70–72], 该方法已用于盲量子计算 [73]. 这样给出量子互联网 [74] 中, 量子态转移的一个重要选择.

为什么发送方 Alice 不采用经典通信将单比特量子态的参数告诉 Bob, 让他自己制备一个量子态呢? 首先, 要精确地描述一个量子态需要大量的经典比特, 利用经典保密通信达不到直接传输的目的; 第二, 由于在传输过程中, 窃听者可以用多种方法窃听, 从而难于保密。

最后我们做一总结. 我们提出了一种不使用纠缠态进行任意量子态的安全直接传输的方法. 本方案的安全性由 DL04 协议中的窃听检测方法保证, DL04 协议的安全性可由搭线信道理论给出定量分析^[25]; 本方案的可靠性由单比特量子态纯化环节确保. 目前, 基于 DL04 协议的实验已在光纤系统^[17,23]及自由空间^[26]中得到演示, 单比特量子态纯化的 CEM 方案^[67]也在光学系统^[68]和核磁系统^[69]中得到了实验演示, 二者在理论和实验方面的研究工作均较为成熟和完善. 量子直接传态的演示将会在实验上实现. 本方案扩大了量子直接通信的用途, 除了进行经典信息的安全传输外, 在没有量子纠缠的情况下, 利用量子直接态传输还可以完成一些分布式量子信息处理任务。

参考文献

- [1] Bennett C H, Brassard G 1984 *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems & Signal Processing* Bangalore, India, December 10–12, 1984 p175
- [2] Zhang G, Haw J Y, Cai H, Xu F, Assad S M, Fitzsimons J F, Zhou X, Zhang Y, Yu S, Wu J, Ser W, Kwek L C, Liu A Q 2019 *Nat. Photonics* **13** 839
- [3] Gu W Y, Zhao S H, Dong C, Wang X Y, Yang D 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 240301 (in Chinese) [谷文苑, 赵尚弘, 东晨, 王星宇, 杨鼎 2019 物理学报 **68** 240301]
- [4] Gu W Y, Zhao S H, Dong C, Zhu Z D, Qu Y Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 090302 (in Chinese) [谷文苑, 赵尚弘, 东晨, 朱卓丹, 屈亚运 2019 物理学报 **68** 090302]
- [5] Yang L, Ma H Y, Zheng C, Ding X L, Gao J C, Long G L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 230303 (in Chinese) [杨璐, 马鸿洋, 郑超, 丁晓兰, 高健存, 龙桂鲁 2017 物理学报 **66** 230303]
- [6] Wilkinson K N, Papanastasiou P, Ottaviani C, Gehring T, Pirandola S 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 033424
- [7] Valivarthi R, Etheverry S, Aldama J, Zwiehoff F, Pruneri V 2020 *Opt. Express* **28** 14547
- [8] Eriksson T A, Luís R S, Puttnam B J, Rademacher G, Fujiwara M, Awaji Y, Furukawa H, Wada N, Takeoka M, Sasaki M 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 2214
- [9] Du C, Wang J D, Qin X J, Wei Z J, Yu Y F, Zhang Z M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 190301 (in Chinese) [杜聪, 王金东, 秦晓娟, 魏正军, 於亚飞, 张智明 2020 物理学报 **69** 190301]
- [10] Ye W, Guo Y, Xia Y, Zhong H, Zhang H, Ding J Z, Hu L Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 060301 (in Chinese) [叶炜, 郭迎, 夏莹, 钟海, 张欢, 丁建科, 胡利云 2020 物理学报 **69** 060301]
- [11] Long G L, Liu X S 2002 *Phys. Rev. A* **65** 032302
- [12] Deng F G, Long G L, Liu X S 2003 *Phys. Rev. A* **68** 042317
- [13] Deng F G, Long G L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 052319
- [14] Wang C, Deng F G, Li Y S, Liu X S, Long G L 2005 *Phys. Rev. A* **71** 044305
- [15] Wang J, Chen H Q, Zhang Q, Tang C J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 673 (in Chinese) [王剑, 陈皇卿, 张权, 唐朝京 2007 物理学报 **56** 673]
- [16] Wang T Y, Qin S J, Wen Q Y, Zhu F C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7452 (in Chinese) [王天银, 秦素娟, 温巧燕, 朱甫臣 2008 物理学报 **57** 7452]
- [17] Hu J Y, Yu B, Jing M Y, Xiao L T, Jia S T, Qin G Q, Long G L 2016 *Light Sci. Appl.* **5** e16144
- [18] Cao Z W, Zhao G, Zhang S H, Feng X Y, Peng J Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 230301 (in Chinese) [曹正文, 赵光, 张爽浩, 冯晓毅, 彭进业 2016 物理学报 **65** 230301]
- [19] Zhu F, Zhang W, Sheng Y B, Huang Y D 2017 *Sci. Bull.* **62** 1519
- [20] Zhang W, Ding D S, Sheng Y B, Zhou L, Shi B S, Guo G C 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 220501
- [21] Liu Z H, Chen H W 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 130304 (in Chinese) [刘志昊, 陈汉武 2017 物理学报 **66** 130304]
- [22] Zheng X Y, Long Y X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 180303 (in Chinese) [郑晓毅, 龙银香 2017 物理学报 **66** 180303]
- [23] Qi R Y, Sun Z, Lin Z S, Niu P H, Hao W T, Song L Y, Huang Q, Gao J C, Yin L G, Long G L 2019 *Light Sci. Appl.* **8** 22
- [24] Wang C 2021 *Fundamental Research* **1** 91
- [25] Wu J W, Lin Z S, Yin L G, Long G L 2019 *Quantum Eng.* **1** e26
- [26] Pan D, Lin Z S, Wu J W, Zhang H R, Sun Z, Ruan D, Yin L G, Long G L 2020 *Photonics Res.* **8** 1522
- [27] Zhou Z R, Sheng Y B, Niu P H, Yin L G, Long G L, Hanzo L 2020 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **63** 230362
- [28] Li T, Long G L 2020 *New J. Phys.* **22** 063017
- [29] Yang L, Wu J W, Lin Z S, Yin L G, Long G L 2020 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **63** 110311
- [30] Niu P H, Wu J W, Yin L G, Long G L 2020 *Quantum Inf. Process.* **19** 356
- [31] Sun Z, Song L Y, Huang Q, Yin L G, Long G L, Lu J H, Hanzo L 2020 *IEEE Trans. Commun.* **68** 5778
- [32] Bergmann K, Theuer H, Shore B W 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 1003
- [33] Vitanov N V, Halfmann T, Shore B W, Bergmann K 2001 *Annu. Rev. Phys. Chem.* **52** 763
- [34] Song K H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4730 (in Chinese) [宋克慧 2005 物理学报 **54** 4730]
- [35] Xiang S H, Song K H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1190 (in Chinese) [向少华, 宋克慧 2005 物理学报 **54** 1190]
- [36] Yang X, Tong Z Y, Kuang L M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1689 (in Chinese) [杨雄, 童朝阳, 匡乐满 2008 物理学报 **57** 1689]
- [37] Tian L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 153604
- [38] Wang Y D, Clerk A A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 153603
- [39] Wang Y, Zhang H, Chen J, Wang L M, Zhang L J, Li C Y, Zhao J M, Jia S T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 093201 (in Chinese) [王勇, 张好, 陈杰, 王丽梅, 张临杰, 李昌勇, 赵建明, 贾锁堂 2013 物理学报 **62** 093201]
- [40] Chen Y H, Xia Y, Chen Q Q, Song J 2014 *Phys. Rev. A* **89** 033856
- [41] Lei F C, Gao M, Du C G, Ling J Q, Long G L 2015 *Opt. Express* **23** 11509
- [42] Baksic A, Ribeiro H, Clerk A A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 230503
- [43] Xu X S, Zhang H, Kong X Y, Wang M, Long G L 2020 *Photonics Res.* **8** 490

- [44] Hu X M, Zhang C, Zhang C J, Liu B H, Huang Y F, Han Y J, Li C F, Guo G C 2019 *Quantum Eng.* **1** e13
- [45] Mastriani M, Iyengar S S 2020 *Quantum Eng.* **2** e55
- [46] Do H, Malaney R, Green J 2021 *Quantum Eng.* **3** e60
- [47] Zhou P, Lv L, He L M 2021 *Quantum Eng.* **3** e64
- [48] Wang T J, Yang G Q, Wang C 2020 *Phys. Rev. A* **101** 012323
- [49] Cirac J I, Ekert A K, Huelga S F, Macchiavello C 1999 *Phys. Rev. A* **59** 4249
- [50] Lim Y L, Beige A, Kwek L C 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 030505
- [51] Serafini A, Mancini S, Bose S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 010503
- [52] Jiang L, Taylor J M, Sørensen A S, Lukin M D 2007 *Phys. Rev. A* **76** 062323
- [53] Feng X L, Qian J, Kwek L C, Oh C H 2008 *Phys. Rev. A* **78** 012354
- [54] van Meter R, Ladd T D, Fowler A G, Yamamoto Y 2010 *Int. J. Quantum Inf.* **8** 295
- [55] Matsuzaki Y, Benjamin S C, Fitzsimons J 2010 *Phys. Rev. A* **82** 010302
- [56] Wu C, Fang M F, Xiao X, Li Y L, Cao S 2011 *Chin. Phys. B* **20** 020305
- [57] Li Y, Benjamin S C 2012 *New J. Phys.* **14** 093008
- [58] Sheng Y B, Zhou L 2017 *Sci. Bull.* **62** 1025
- [59] Hua M, Tao M J, Alsaedi A, Hayat T, Deng F G 2018 *Ann. Phys. (Berlin)* **530** 1700402
- [60] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, Zoller P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932
- [61] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [62] Guo H, Li Z Y, Peng X 2016 *Quantum Cryptography* (Beijing: National Defense Industry Press) p539 (in Chinese) [郭弘, 李政宇, 彭翔 2016 量子密码(北京: 国防工业出版社) 第539页]
- [63] Bennett C H, Brassard G, Popescu S, Schumacher B, Smolin J A, Wootters W K 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 722
- [64] Lo H K 2000 *Phys. Rev. A* **62** 012313
- [65] Pati A K 2020 *Phys. Rev. A* **63** 014302
- [66] Bennett C H, DiVincenzo D P, Shor P W, Smolin J A, Terhal B M, Wootters W K 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 077902
- [67] Cirac J I, Ekert A K, Macchiavello C 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4344
- [68] Ricci M, De Martini F, Cerf N J, Filip R, Fiurásek J, Macchiavello C 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 170501
- [69] Hou S Y, Sheng Y B, Feng G R, Long G L 2014 *Sci. Rep.* **4** 6857
- [70] Han C, Zhou Z W, Guo G C 2006 *J. Phys. B:At. Mol. Opt. Phys.* **39** 1677
- [71] Deng F G, Li X H, Li T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 130301 (in Chinese) [邓富国, 李熙涵, 李涛 2018 物理学报 **67** 130301]
- [72] Sun Y 2013 *Acta Sin. Quantum Opt.* **19** 122 (in Chinese) [孙越 2013 量子光学学报 **19** 122]
- [73] Sheng Y B, Zhou L 2018 *Phys. Rev. A* **98** 052343
- [74] Qin W, Wang C, Cao Y, Long G L 2014 *Phys. Rev. A* **89** 062314

Quantum direct portation*

Wang Ming-Yu¹⁾²⁾ Wang Xin-De³⁾ Ruan Dong¹⁾²⁾ Long Gui-Lu^{1)2)4)†}

1) (*State Key Laboratory of Low-Dimensional Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Frontiers Science Research Center, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*School of Physics, Qingdao University, Qingdao 266071, China*)

4) (*Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China*)

(Received 2 May 2021; revised manuscript received 24 May 2021)

Abstract

Quantum state that carries classical information, 0 or 1, can be safely and reliably transmitted using quantum secure direct communication. How to transmit an arbitrary quantum state is a wider issue and has important applications. One way is to use quantum teleportation, namely, first distribute a large number of Einstein-Podolsky-Rosen pairs, and then perform entanglement purification to obtain a near-perfect pair, and make quantum teleportation using the pair. In this article, we propose a method that directly port the quantum state with security and reliability using quantum secure direct communication. After sufficient number of copies of the same state have been directly ported, single-particle purification is performed to obtain a near perfect single particle state. This is important because it offers a new method for sending an arbitrary single particle state securely and reliably without using quantum teleportation. It is also an important extension of quantum secure direct communication to send an arbitrary quantum state. Quantum direct portation will have great potential in quantum internet.

Keywords: quantum direct portation, quantum secure direct communication, quantum secure direct state transportation, single qubit purification

PACS: 03.67.Hk,03.67.Dd

DOI: 10.7498/aps.70.20210837

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974205), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA06Z228), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2017YFA0303700), the Key R&D Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030325002) and the Beijing Advanced Innovation Center for Future Chip (ICFC).

† Corresponding author. E-mail: glong@tsinghua.edu.cn