

文章编号:1004-4213(2010)11-2078-5

基于纠缠交换和团簇态实现二粒子任意态的可控隐形传态*

刘俊昌¹, 李渊华¹, 聂义友^{1,2,†}

(1 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

(2 江西省光电子与通信重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 提出一个对二粒子任意态的可控隐形传态方案, 利用四粒子团簇态作为量子信道, 用 EPR 态实现控制. 首先, 发送者向控制者提出申请, 控制者再对其拥有的 2 个粒子做 Bell 基测量, 并把结果通知发送者, 实现纠缠交换. 然后, 发送者对自己手中的四个粒子做适当的么正变换, 接着进行纽曼测量, 并把结果通知接受者. 接受者根据发送者的测量结果, 对自己拥有的粒子做适当的么正变换, 就可以重建发送者的二粒子任意态. 方案成功的概率为 100%.

关键词: 量子光学; 团簇态; 可控量子隐形传态; 二粒子任意态; 纠缠交换

中图分类号: O431.2; TN918

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103911.2078

0 引言

量子纠缠是量子力学特有的现象, 是量子力学不同于经典物理最奇特最不可思议的特征, 在量子通讯及信息处理过程中扮演了一个重要的角色. 量子隐形传态, 是利用分布式纠缠态和经典信息通道在两地之间实现信息传输的技术. 自 1993 年 Bennett 等人^[1] 提出单粒子未知量子态的隐形传态方案以来, 量子隐形传态已成为量子信息领域研究的热点之一, 并在实验中实现^[2-4]. 到目前为止, 国内外许多研究组已提出了很多利用 EPR 态、GHZ 态、W 态等作为量子信道的量子隐形传态方案^[5-12]. 并发展了可控隐形传态理论, 第一个可控隐形传态方案是利用 Greenberger-Horne-Zeilinger(GHZ)态为量子信道于 1998 年提出来的^[13], 其基本思想是, 通过一个控制者来控制未知量子态的传送, 并被广泛研究^[14-22]. 在这些方案中, 都是以 GHZ 态或 W 态作为量子信道与经典信道一起完成的. 然而, 多量子比特纠缠态比三量子比特纠缠态的情况要复杂得多, 并具有一些特殊的性质. Briegel 和 Raussendorf^[23] 报道了当粒子数 $N > 3$ 时才能体现出来某些特殊性质的一种新的量子态——团簇态.

团簇态具有最大连通的性质 (maximally connected), 其持续纠缠性比人们熟知的 GHZ 态和 W 态更好. 换句话说, 团簇态具有 GHZ 类和 W 类纠缠态的性质, 并且比 GHZ 类纠缠态更难被局域操作破坏^[24-25]. 近年来, 洪等人提出了利用四粒子团簇态实现单粒子可控隐形传态的方案^[26-27]; Zhang 等人提出了利用四粒子团簇态实现任意二粒子态的隐形传态方案^[28]. 表明四粒子团簇态是量子信息处理领域的重要资源.

本文提出利用纠缠交换技术和四粒子团簇态为量子信道来实现任意两粒子态的可控隐形传态新方案. 在这个方案中, 控制者首先对自己的粒子在 Bell 基下进行测量, 并与发送者手中的粒子实现纠缠交换, 从而对隐形传态实现控制. 接着发送者对自己的粒子做适当的么正变换, 以变换后的团簇态作为量子信道进行隐形传态. 然后发送者对自己拥有的进行纽曼测量, 并把结果通过经典信道告诉接收者. 最后, 接收者根据发送者的测量结果对自己手中的粒子执行适当的么正变换并获得要传送的量子态, 实现了可控隐形传态.

1 利用纠缠交换和四粒子团簇态实现可控量子隐形传态

假设发送者 Alice、接受者 Bob 和控制者 Charlie 事先共享一个四粒子团簇态, 其中 Alice 拥有 a 粒子, Bob 拥有粒子 b 和 c , Charlie 拥有粒子 d . 这 4 粒子的团簇态为

$$|\Psi\rangle_{abcd} = \frac{1}{2}(|0000\rangle + |0011\rangle + |1100\rangle -$$

* 国家自然科学基金(60807014)、江西省自然科学基金(2009GZW0005)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放课题和江西省教育厅科研项目(GJJ09153)资助

† Tel: 0791-8120376

Email: nieyiyou@163.com

收稿日期: 2010-03-29

修回日期: 2010-05-14

$$|1111\rangle\rangle_{abcd} \quad (1)$$

又假设发送者 Alice 和控制者 Charlie 同时还共享一个 Bell 态 $|\varphi^+\rangle_{12} = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$, 其中粒子 1 属于 Charlie, 粒子 2 属于 Alice.

现在, Alice 想把一个任意的未知二粒子态 $|\Phi\rangle$ 传送给远方的 Bob. $|\Phi\rangle$ 可写为

$$|\Phi\rangle_{xy} = \alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \theta|11\rangle \quad (2)$$

式中, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\theta|^2 = 1$.

为了实现隐形传态, 首先 Alice 通过经典信道向 Charlie 申请量子通道. 如果 Charlie 愿意帮助 Alice 和 Bob 完成量子隐形传态, 则对他们的粒子进行纠缠交换, 从而实现对隐形传态的控制. 纠缠交换的基本原理是: 粒子 a, b, c, d 和粒子 1, 2 为两组处于四粒子团簇态和 Bell 态的粒子, 通过对粒子 $d, 1$ 进行适当的操作, 使得非纠缠粒子 $a, b, c, 2$ 处于量子纠缠态. 把这 6 个粒子看成一个量子系统, 其量子态可表示为

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{abcd12} &= |\Psi\rangle_{abcd} \otimes |\varphi^+\rangle_{12} = |\varphi^+\rangle_{d1} |\Psi^1\rangle_{abc2} + \\ &|\varphi^-\rangle_{d1} |\Psi^2\rangle_{abc2} + |\varphi^+\rangle_{d1} |\Psi^3\rangle_{abc2} + |\varphi^-\rangle_{d1} |\Psi^4\rangle_{abc2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $|\varphi^\pm\rangle_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)_{d1}$,

$$|\varphi^\pm\rangle_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)_{d1},$$

$$|\Psi^1\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(|0000\rangle + |0011\rangle + |1100\rangle - |1111\rangle)_{abc2},$$

$$|\Psi^2\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(|0000\rangle - |0011\rangle + |1100\rangle + |1111\rangle)_{abc2},$$

$$|\Psi^3\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(|0001\rangle + |0010\rangle - |1110\rangle + |1101\rangle)_{abc2},$$

$$|\Psi^4\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(|0001\rangle - |0010\rangle + |1101\rangle + |1110\rangle)_{abc2}.$$

现在对粒子 $d, 1$ 在 Bell 基下进行联合投影测量, 就能获得粒子 $a, b, c, 2$ 所处的纠缠态. 例如, 若测量结果是 $|\varphi^+\rangle_{d1}$, 则粒子 $a, b, c, 2$ 就处于纠缠态 $|\Psi^1\rangle_{abc2}$; 如果测量结果分别是 $|\varphi^-\rangle_{d1}$ 、 $|\varphi^+\rangle_{d1}$ 、 $|\varphi^-\rangle_{d1}$, 则粒子 $a, b, c, 2$ 分别处于 $|\Psi^2\rangle_{abc2}$ 、 $|\Psi^3\rangle_{abc2}$ 、 $|\Psi^4\rangle_{abc2}$ 纠缠态. 这样就实现了粒子 a, b, c, d 和粒子 1, 2 之间的纠缠交换.

现在 Charlie 把测量结果通过经典信道告诉 Alice, 根据测量结果 $|\Psi^1\rangle_{abc2}$ 、 $|\Psi^2\rangle_{abc2}$ 、 $|\Psi^3\rangle_{abc2}$ 和 $|\Psi^4\rangle_{abc2}$ Alice 对粒子 2 做相应的么正变换 I 、 σ_x 、 σ_y 和 $\sigma_x\sigma_z$. 则粒子 $a, b, c, 2$ 所处的纠缠态可表示为

$$|\Psi\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(|0000\rangle + |0011\rangle + |1100\rangle -$$

$$|1111\rangle\rangle_{abc2} \quad (4)$$

也就是说, 现在发送者 Alice 和接收者 Bob 共享一个四粒子团簇态 $|\Psi\rangle_{abc2}$, 其中 Alice 拥有粒子 a 和 2, Bob 拥有粒子 b 和 c . 纠缠度的定义为

$$\epsilon(\varphi) = -\text{Tr}(\rho_A \log_2 \rho_A) = -\text{Tr}(\rho_B \log_2 \rho_B)$$

根据文献[28]给出 a 和 b (或 c) 与 2 和 c (或 b) 的纠缠度都为

$$\epsilon = -\frac{2+\sqrt{3}}{4} \log_2 \left(\frac{2+\sqrt{3}}{4} \right) - \frac{2-\sqrt{3}}{4} \log_2 \left(\frac{2-\sqrt{3}}{4} \right)$$

现在以 $|\Psi\rangle_{abc2}$ 为量子信道, 考虑由处于未知态的粒子 x, y 和处于团簇态的粒子 $a, b, c, 2$ 所构成的六粒子量子体系, 其总量子态为

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{xyabc2} &= |\Phi\rangle_{xy} \otimes |\Psi\rangle_{abc2} = \frac{1}{2}(\alpha|000000\rangle + \\ &\beta|010000\rangle + \gamma|100000\rangle + \theta|110000\rangle + \\ &\alpha|000011\rangle + \beta|010011\rangle + \gamma|100011\rangle + \\ &\theta|110011\rangle + \alpha|001100\rangle + \beta|011100\rangle + \\ &\gamma|101100\rangle + \theta|111100\rangle - \alpha|001111\rangle - \\ &\beta|011111\rangle - \gamma|101111\rangle - \theta|111111\rangle)_{xyabc2} \end{aligned} \quad (5)$$

Alice 对自己手中的四个粒子 $x, y, a, 2$ 在下列一组四粒子正交完备基 $\{|\eta_i\rangle\}$ 下进行测量

$$|\eta_1\rangle = |0000\rangle + |0101\rangle + |1010\rangle + |1111\rangle,$$

$$|\eta_2\rangle = |0000\rangle + |0101\rangle - |1010\rangle - |1111\rangle,$$

$$|\eta_3\rangle = |0000\rangle - |0101\rangle + |1010\rangle - |1111\rangle,$$

$$|\eta_4\rangle = |0000\rangle - |0101\rangle - |1010\rangle + |1111\rangle,$$

$$|\eta_5\rangle = |0100\rangle + |1001\rangle + |1110\rangle + |0011\rangle,$$

$$|\eta_6\rangle = |0100\rangle + |1001\rangle - |1110\rangle - |0011\rangle,$$

$$|\eta_7\rangle = |0100\rangle - |1001\rangle + |1110\rangle - |0011\rangle,$$

$$|\eta_8\rangle = |0100\rangle - |1001\rangle - |1110\rangle + |0011\rangle,$$

$$|\eta_9\rangle = |1000\rangle + |1101\rangle + |0010\rangle + |0111\rangle,$$

$$|\eta_{10}\rangle = |1000\rangle + |1101\rangle - |0010\rangle - |0111\rangle,$$

$$|\eta_{11}\rangle = |1000\rangle - |1101\rangle + |0010\rangle - |0111\rangle,$$

$$|\eta_{12}\rangle = |1000\rangle - |1101\rangle - |0010\rangle + |0111\rangle,$$

$$|\eta_{13}\rangle = |1100\rangle + |0001\rangle + |0110\rangle + |1011\rangle,$$

$$|\eta_{14}\rangle = |1100\rangle + |0001\rangle - |0110\rangle - |1011\rangle,$$

$$|\eta_{15}\rangle = |1100\rangle - |0001\rangle + |0110\rangle - |1011\rangle,$$

$$|\eta_{16}\rangle = |1100\rangle - |0001\rangle - |0110\rangle + |1011\rangle,$$

显然, Alice 的测量结果为 $|\eta_i\rangle (i=1, 2, \dots, 16)$ 中的一个, 测得每一个的概率为 $1/16$. 相应的 Bob 也获得 16 个量子态 $|\Psi\rangle_{bc}^i (i=1, 2, \dots, 16)$ 中的一个. Alice 可能的测量结果和 Bob 获得的相应量子态分别列于表 1 中.

表 1 Alice 可能的测量结果和 Bob 获得的相应量子态(为方便起见,常量因子略去)

Table 1 The outcome of the measurements performed by Alice and the corresponding states obtained by Bob, where the normalization factors have been omitted for convenience

Alice' result $ \eta_i\rangle$	State obtained by Bob $ \Psi\rangle_{bc}^i$
$ \eta_1\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^1 = \alpha 00\rangle + \beta 01\rangle + \gamma 10\rangle - \theta 11\rangle$
$ \eta_2\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^2 = \alpha 00\rangle + \beta 01\rangle - \gamma 10\rangle + \theta 11\rangle$
$ \eta_3\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^3 = \alpha 00\rangle - \beta 01\rangle + \gamma 10\rangle + \theta 11\rangle$
$ \eta_4\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^4 = \alpha 00\rangle - \beta 01\rangle - \gamma 10\rangle - \theta 11\rangle$
$ \eta_5\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^5 = -\alpha 11\rangle + \beta 00\rangle + \gamma 01\rangle + \theta 10\rangle$
$ \eta_6\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^6 = \alpha 11\rangle + \beta 00\rangle + \gamma 01\rangle - \theta 10\rangle$
$ \eta_7\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^7 = \alpha 11\rangle + \beta 00\rangle - \gamma 01\rangle + \theta 10\rangle$
$ \eta_8\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^8 = -\alpha 11\rangle + \beta 00\rangle - \gamma 01\rangle - \theta 10\rangle$
$ \eta_9\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^9 = \alpha 10\rangle - \beta 11\rangle + \gamma 00\rangle + \theta 01\rangle$
$ \eta_{10}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{10} = -\alpha 10\rangle + \beta 11\rangle + \gamma 00\rangle + \theta 01\rangle$
$ \eta_{11}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{11} = \alpha 10\rangle + \beta 11\rangle + \gamma 00\rangle - \theta 01\rangle$
$ \eta_{12}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{12} = -\alpha 10\rangle - \beta 11\rangle + \gamma 00\rangle - \theta 01\rangle$
$ \eta_{13}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{13} = \alpha 01\rangle + \beta 10\rangle - \gamma 11\rangle + \theta 00\rangle$
$ \eta_{14}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{14} = \alpha 01\rangle - \beta 10\rangle + \gamma 11\rangle + \theta 00\rangle$
$ \eta_{15}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{15} = -\alpha 01\rangle + \beta 10\rangle + \gamma 11\rangle + \theta 00\rangle$
$ \eta_{16}\rangle$	$ \Psi\rangle_{bc}^{16} = -\alpha 01\rangle - \beta 10\rangle - \gamma 11\rangle + \theta 00\rangle$

然后, Alice 把自己的测量结果通过经典信道告诉 Bob. 知道 Alice 的测量结果后, Bob 对自己拥有的两个粒子 b, c 做适当的幺正变换, 便得到了 Alice 要传送给他的初态, 从而完成隐形传态. Bob 所做的幺正变换列于表 2 中.

表 2 Bob 获得的态和所做的相应的幺正变换

Table 2 The states obtained by Bob and the corresponding unitary transformation

$ \Psi\rangle_{bc}^i$	U_{bc}^i	$ \Psi\rangle_{bc}^j$	U_{bc}^j
$ \Psi\rangle_{bc}^1$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^9$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^2$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{10}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^3$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{11}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^4$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{12}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^5$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{13}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$ \Psi\rangle_{bc}^i$	U_{bc}^i	$ \Psi\rangle_{bc}^j$	U_{bc}^j
$ \Psi\rangle_{bc}^6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{14}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^7$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{15}$	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$ \Psi\rangle_{bc}^8$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	$ \Psi\rangle_{bc}^{16}$	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

假设窃听者 Eva 设法使一个粒子 E 和 Bob 的粒子纠缠在一起, 可以分析 Eva 是否可以通过测量粒子 E 来获得未知量子比特的状态信息. 假设他们三个都不知道 Eva 的存在, 之后, Charlie 执行 Bell 测量, 综合系统 Alice、Bob 和 Eva 演变成一个纠缠态. 现在, 如果 Alice 执行一个四粒子完备基的测量, Bob-Eve 系统将坍塌到一个直积态, 没有给 Eva 任何关于未知量子比特的信息. 例如, 粒子 E 的初态为 $|0\rangle_E$, 传态过程中 Charlie 和 Alice 测量结果分别为 $|\varphi^+\rangle_{d1}$ 和 $|\eta_1\rangle$, 最后 Bob-Eve 系统将坍塌到 $\alpha(|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle - \theta|11\rangle)_{bc}|0\rangle_E$, 粒子 E 状态没有改变, 所以 Eva 没有获得任何关于未知量子比特状态的信息, 方案对这类的窃听攻击是安全的. 防窃听的安全性还可以按文献[29-31]中方法检验和证明, 因此这个方案是安全的.

2 结论

本文提出了利用纠缠交换技术和四粒子团簇态为量子信道实现任意两粒子未知态的可控量子隐形传态的新方案. 在这个方案中, 四粒子团簇态被一个发送者, 一个控制者和一个接收者事先共享. 首先, 控制者对他拥有的两个粒子进行一次 Bell 基测量, 实现纠缠交换. 根据控制者的结果, 发送者对他的粒子做适当的幺正变换, 并把得到的新的团簇态做为他接收者之间的量子信道. 接着, 发送者做一次四粒子完备基的纽曼测量, 并通过经典信道告诉接收者. 最后, 接收者根据来自发送者的测量结果, 执行适当的幺正变换, 就获得了要传送的量子态, 从而完成了任意二粒子未知态的可控量子隐形传态. 可控量子隐形传态成功的概率是 100%, 并且方案是安全的. 没有控制者的协作, 接收者无法获得任意二粒子未知态的初态. 这一方案的价值可以用来建立一个可控量子通道, 可能在未来的量子计算中得到应用.

参考文献

- [1] BENNETT C H, BRASSARD G, CREPEAU C, *et al.* Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **70**(13): 1895-1899.
- [2] BOUWMEESTER D, PAN J W, MATTLE K, *et al.* Experimental quantum teleportation[J]. *Nature*, 1997, **390**(6660): 575-579.
- [3] CAI Xin-hua, NIE Jian-jun, GUO Jie-rong. Entanglement translation and quantum teleportation of the single-photon entangled state[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 776-778.
- [4] XIONG Xue-shi, FU Jie, SHEN Ke. Controlled teleportation of an unknown two-particle partly entangled state[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 780-782.
熊学仕,付洁,沈柯. 二粒子部分纠缠未知态的量子受控传递[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 780-782.
- [5] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing; proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India, December 10-12, 1984 [C]. *IEEE*, 1984, **175**: 175-179.
- [6] BENNETT C H, WIESNER S J. Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(20): 2881-2884.
- [7] EKERT A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**(6): 661-663.
- [8] DAI Hong-yi, CHEN Ping-xing, LI Cheng-zu. Probabilistic teleportation of an arbitrary two-particle state by a partially entangled three-particle GHZ state and W state [J]. *Opt Commun*, 2004, **231**(1-6): 281-287.
- [9] DING Dong, YAN Feng-li. Probabilistic Teleportation of an arbitrary three-particle state[J]. *Journal of Hebei Normal University*, 2006, **30**(4): 407-410.
丁东,闫凤利. 任意两粒子态的概率隐形传输[J]. *河北师大学报*, 2006, **30**(4): 407-410.
- [10] DING Dong, YAN Feng-li. Probabilistic teleportation of a two-particle state by a partially entangled four-particle state [J]. *Journal of Hebei Normal University*, 2007, **31**(1): 43-45.
丁东,闫凤利. 利用四粒子纠缠态对未知的两粒子态的概率的隐形传态[J]. *河北师大学报*, 2007, **31**(1): 43-45.
- [11] KARLSSON A, BOURENNANE M. Quantum teleportation using three-particle entanglement[J]. *Phys Rev A*, 1998, **58**(6): 4394-4400.
- [12] LI De-chao, SHI Zhong-ke. The probabilistic teleportation via bi-particle mixed state[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 983-986.
李得超,史忠科. 基于混合纠缠态的概率隐形传态[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 983-986.
- [13] CLEVE R, GOTTESMAN D, LO H K. How to share a quantum secret[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**(3): 648-651.
- [14] IKRAM M, ZHU Shi-yao, ZUBAIRY M S. Quantum teleportation of an entangled state[J]. *Phys Rev A*, 2000, **62**(2): 022307.
- [15] HUELGA S F, VACCARO J A, CHEFLES A, *et al.* Quantum remote control: Teleportation of unitary operations [J]. *Phys Rev A*, 2001, **63**(4): 042303.
- [16] YAN Feng-li, WANG Dong. Probabilistic and controlled teleportation of unknown quantum states[J]. *Phys Lett A*, 2003, **316**(5): 297-303.
- [17] YANG C P, CHU S I, HAN S Y. Efficient many-party controlled teleportation of multiqubit quantum information via entanglement[J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**(2): 022329.
- [18] DENG Fu-guo, LI Chun-yan, LI Yan-song, *et al.* Symmetric multiparty-controlled teleportation of an arbitrary two-particle entanglement [J]. *Phys Rev A*, 2005, **72**(2): 022338.
- [19] AGRAWAL P, PATI A. Perfect teleportation and superdense coding with W states[J]. *Phys Rev A*, 2006, **74**(6): 062320.
- [20] MAN Zhong-xiao, XIA Yun-jie, AN N B. Genuine multiqubit entanglement and controlled teleportation [J]. *Phys Rev A*, 2007, **75**(5): 052306.
- [21] WU Huai-zhi, YANG Zhen-biao, SUN Wan-jun, *et al.* Quantum information splitting based on current cavity QED techniques[J]. *Commun Theor Phys*, 2008, **49**(5): 1165-1168.
- [22] YU Xi-mei, GU Yong-jian, MA Li-zhen, *et al.* Scheme for splitting quantum information via W states in cavity QED systems[J]. *Chinese Physics B*, 2008, **17**(2): 462-466.
- [23] BRIEGEL H J, RAUSSENDORF R. Persistent entanglement in arrays of interacting particles[J]. *Phys Rev Lett A*, 2001, **86**(5): 910-913.
- [24] LI Da-chuang, CAO Zhou-liang. Teleportation of two-particle entangled state via cluster state[J]. *Commun Theor Phys*, 2007, **47**(3): 464-466.
- [25] DONG Ping, XUE Zheng-yuan, YANG Ming, *et al.* Generation of cluster states[J]. *Phys Rev A*, 2006, **73**(3): 033818.
- [26] HONG Zhi-hui, NIE Yi-you, HUANG Yi-bin, *et al.* Controlled quantum teleportation via four particle cluster state[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(4): 458-461.
洪智慧,聂义友,黄亦斌,等. 基于四粒子团簇态的可控量子隐形传态[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(4): 458-461.
- [27] NIE Yi-you, HONG Zhi-hui, HUANG Yi-bin, *et al.* Non-maximally entangled controlled teleportation using four particles cluster states[J]. *Int J Theor Phys*, 2009, **48**(5): 1485-1490.
- [28] ZHANG Bin-bin, LIU Yu. Economic and deterministic quantum teleportation of arbitrary bipartite pure and mixed state with shared cluster entanglement [J]. *Int J Theor Phys*, 2009, **48**(9): 2644-2651.
- [29] MURALIDHARAN S, PANIGRAHI P K. Quantum-information splitting using multipartite cluster states [J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**(6): 062333.
- [30] MURALIDHARAN S, PANIGRAHI P K. Perfect teleportation, quantum-state sharing, and superdense coding through a genuinely entangled five-qubit state[J]. *Phys Rev A*, 2008, **77**(3): 032321.
- [31] CHOUDHURY S, MURALIDHARAN S, PANIGRAHI P K. Quantum teleportation and state sharing using a genuinely entangled six qubit state[J]. *J of Phys A: Mathematical and Theoretical*, 2009, **42**(11): 15303.

Controlled Teleportation of an Arbitrary Two-particle State by Using a Four-qubit Cluster State and Entanglement Swapping

LIU Jun-chang¹, LI Yuan-hua¹, NIE Yi-you^{1,2}

(1 *Department of Physics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*)

(2 *Key Laboratory of Photoelectronic & Telecommunication of Jiangxi Province, Nanchang 330022, China*)

Abstract: A new scheme for controlled teleportation of an arbitrary two-particle state is proposed in detail, using a four-particle cluster state as quantum channel and EPR state to achieve control. First of all, the sender applies to the controller, and then the controller performs the Bell-based measurement on the two particles of his own. And the controller notifies the sender to achieve entanglement swapping. Then, the sender makes the appropriate unitary transformation and performs a Newman measurements on the four particles of his own. And the results inform the receiver. According to the sender's measurement results, the receiver can reconstruct the arbitrary two-particle state after he makes the appropriate unitary transformation on his own particles. The success probability of the program is 100%.

Key words: Quantum optics; Cluster state; Controlled teleportation; Arbitrary two-particle state; Entanglement swapping



LIU Jun-chang was born in 1986. Now he is a graduate student at College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University. His major research focuses on quantum optics and quantum information.



NIE Yi-you was born in 1963. He is a professor at College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University. Now he is engaged in the research of quantum optics, quantum computation and quantum information.