

基于非最大纠缠的五粒子 Cluster 态的 高效量子态共享方案*

孙新梅[†] 查新未 祁建霞 兰倩

(西安邮电大学, 理学院, 西安 710061)

(2013年7月4日收到; 2013年9月1日收到修改稿)

本文提出了一个新的未知量子态共享方案, 使用一个非最大纠缠的五粒子 Cluster 态作为量子通道来实现任意两粒子未知量子态的共享. 即就是发送方 (Alice), 接收方 (Bob) 和控制方 (Charlie) 共享一个非最大纠缠的五粒子 Cluster 态. 与以前传统方案不同, 在本方案中发送方引入一个辅助粒子, 并对其手中的粒子进行正交完备基测量, 而接收方不需要引入辅助粒子, 只需要执行适当的么正操作, 即可以方便的完成信息的顺利接收. 控制方通过对自己手中的粒子做单粒子投影测量来控制 and 协助通信双方, 使得任意两粒子的未知量子态共享方案得以成功实现.

关键词: 量子态共享, 五粒子 Cluster 态, 正交完备基测量, 单粒子投影测量

PACS: 03.67.Hk, 03.67.-a, 03.65.-w

DOI: 10.7498/aps.62.230302

1 引言

量子纠缠作为一种宝贵的物理资源, 在量子信息处理中起着重要作用. 量子通信是指利用量子纠缠效应进行信息传递的一种新型的通讯方式, 是量子论和信息论相结合的新的研究领域, 量子通信具有高效率 and 绝对安全等特点. 多年来, 人们在量子信息学科的理论 and 实验上的研究都取得了长足的发展. 1984年, Bennett 和 Brassard 提出了第一个量子密钥分配体系即所谓的 BB84 协议^[1]; 1993年, Bennett 等提出量子隐形传态的方案^[2]; 1997年, 奥地利 Innsbruck 大学的研究小组实验实现量子隐形传态^[3]; 2010年6月, 我国潘建伟成功地将量子隐形传态的距离提高到 16 km.

自从 BB84 量子密钥分配方案被提出以来, 量子通信无论在理论上还是在实验上都取得大量的研究成果, 吸引了许多科学家加入这一研究领域. 量子通信包括许多分支, 例如量子隐形传态^[2-14]、量子密钥分配^[15-25]、量子安全直接通信^[26-33]、稠密编码^[34-36]、量子秘密共享^[37-44] 和量子态远

程制备^[45-47] 等等. 其中量子秘密共享是量子通信的一个重要的分支. 秘密共享的含义是将秘密以适当的方式拆分, 拆分后的每一个子秘密由不同的参与者管理, 只有若干个参与者共同协作才能恢复出秘密信息. 量子秘密共享不仅可以共享经典信息, 还可以共享量子信息. 量子信息的秘密共享通常也被称为量子态共享. 1999年, Cleve 等人^[48] 利用量子纠错码的性质提出了第一个 (k, n) 门限的量子态共享方案. 此后, 无论在理论方面还是在实验方面, 各种各样的量子态共享方案相继被提出. 2004年, Lance 等人^[49] 提出了基于连续变量的 $(2, 3)$ 量子态门限的方案; Li 等^[50] 基于纠缠交换提出了一个共享量子消息的量子态共享协议. 2005年, Deng 等人^[41] 提出了一个基于纠缠光子对的任意两粒子量子态共享方案; Zhang 等^[51] 利用 Bell 态提出了共享一个任意未知量子比特的多方量子态共享协议. 2006年, Li 等人^[52] 将 Deng 等人的方案推广到任意多粒子量子态共享; Deng 等人^[53] 又提出了一个基于纠缠光子对的任意两粒子环形量子态共享方案; Man 等^[54] 利用非最大纠缠 GHZ 态作为量子信道提出了一个任意多粒子的量子态共享方

* 国家自然科学基金 (批准号: 10902083) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2013JM1009) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: sunxinmei0915@163.com

案. 2010 年, Hou 等^[55] 提出了一个利用五粒子纠缠态和 Bell 基测量实现任意两粒子态共享方案; 2011 年 Nie 等^[56] 提出了一个利用四组 W-class 态作为量子通道的共享任意三粒子量子态的方案. 在此基础上, 2013 年 Chen 等^[57] 提出了利用三组 W-class 态实现任意三粒子的量子态共享方案. 近些年来, 量子态共享在理论和实验上都取得了丰富的研究成果. 在先前的这些研究方案中利用的纠缠资源多数是 Bell 态和 GHZ 态及一些多粒子最大纠缠态. 2001 年 Briegel 和 Raussendorf^[58] 引入的一种不同于 GHZ 态族和 W 态族的纠缠 cluster 态, 它在某些方面比 GHZ 类型的态具有更多的纠缠特性, 而且更难被局域操作破坏掉, 因此被广泛应用于量子信息领域中. 又由于在实际情况中, 受实验条件限制, 环境噪声的影响和退相干不可避免的发生, 使得量子通道的纠缠减少, 此时, 纠缠通道往往不是理想无噪的最大纠缠态, 而是非最大的部分纠缠态.

本文我们提出了一个利用非最大纠缠的五粒子 Cluster 态作为量子通道的量子态共享方案. 为了成功实现量子态的共享, 首先发送方 (Alice) 引入一个辅助粒子, 然后对自己手中粒子做正交完备基测量, 控制方 (Charlie) 通过做单粒子投影测量来控制协助通信双方, 而接收方 (Bob) 只需要做简单的幺正操作, 便可成功接收信息, 这样任意两粒子的量子态的共享得以成功实现, 成功的概率为 $4|a|^2$.

2 任意两粒子的未知量子态的共享方案

假设存在三个合法的使用者 Alice, Bob 和 Charlie, Alice 想要给 Bob 或者 Charlie 发送一个未知的任意两粒子量子态, 如下式所示:

$$|\chi\rangle_{xy} = (x_0|00\rangle + x_1|01\rangle + x_2|10\rangle + x_3|11\rangle)_{xy}, \quad (1)$$

上式中系数 x_0, x_1, x_2, x_3 都是复数, 且满足归一化 $|x_0|^2 + |x_1|^2 + |x_2|^2 + |x_3|^2 = 1$. 若 Alice, Bob 和 Charlie 共享一个非最大纠缠的五粒子 Cluster 态作为量子通道

$$|C_5\rangle_{a_1a_2b_1cb_2} = (a|00000\rangle + b|01011\rangle + c|11110\rangle + d|10101\rangle)_{a_1a_2b_1cb_2}. \quad (2)$$

同样上式中系数 a, b, c, d 也都是复数, 且满足归一化 $|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2 = 1$. 粒子 a_1a_2 属于 Alice, 粒子 b_1b_2 属于 Bob, 粒子 c 属于 Charlie.

第一步 Alice 引入辅助粒子, 对自己手中的粒子进行测量.

为了使 Bob 和 Charlie 能够共享 Alice 的量子态信息 $|\chi\rangle_{xy}$, Alice 首先引入一个辅助粒子 $|0\rangle_A$, 则整个量子系统态就可以表示如下:

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{xya_1Aa_2b_1cb_2} &= |\chi\rangle_{xy} \otimes |C_5\rangle_{a_1a_2b_1cb_2} \otimes |0\rangle_A \\ &= (ax_0|0000000\rangle + bx_0|00001011\rangle \\ &\quad + cx_0|00101110\rangle + dx_0|00100101\rangle \\ &\quad + ax_1|01000000\rangle + bx_1|01001011\rangle \\ &\quad + cx_1|01101110\rangle + dx_1|01100101\rangle \\ &\quad + ax_2|10000000\rangle + bx_2|10001011\rangle \\ &\quad + cx_2|10101110\rangle + dx_2|10100101\rangle \\ &\quad + ax_3|11000000\rangle + bx_3|11001011\rangle \\ &\quad + cx_3|11101110\rangle \\ &\quad + dx_3|11100101\rangle)_{xya_1Aa_2b_1cb_2}. \quad (3) \end{aligned}$$

Alice 对自己所拥有的粒子 xya_1Aa_2 进行测量, 然后将测量的结果通过经典通信告诉 Bob 或 Charlie, 这取决于 Alice 委任谁来重构量子态信息. Alice 所用的测量基为 $|g_i\rangle_{xya_1Aa_2}$, ($i = 1, 2, 3, \dots, 30, 31, 32$), 这里我们先列举部分测量基 (全部测量基见附录 A1), 如下式所示:

$$\begin{aligned} |g_1\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle + \frac{a}{b} |01001\rangle \right. \\ &\quad + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle + \frac{a}{c} |10101\rangle \\ &\quad + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle + \frac{a}{d} |11100\rangle \\ &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\ |g_2\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle + \frac{a}{b} |01001\rangle \right. \\ &\quad + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle - \frac{a}{c} |10101\rangle \\ &\quad - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle - \frac{a}{d} |11100\rangle \\ &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\ |g_3\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle - \frac{a}{b} |01001\rangle \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|01011\rangle + \frac{a}{c}|10101\rangle \\
 & +\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|10111\rangle - \frac{a}{d}|11100\rangle \\
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|11110\rangle)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_4\rangle = & \frac{1}{2}\left(|00000\rangle - \frac{a}{b}|01001\rangle\right. \\
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|01011\rangle - \frac{a}{c}|10101\rangle \\
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|10111\rangle + \frac{a}{d}|11100\rangle \\
 & \left. +\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|11110\rangle\right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_5\rangle = & \frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}|00001\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|00011\rangle\right. \\
 & +|01000\rangle + \frac{a}{d}|10100\rangle \\
 & +\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|10110\rangle + \frac{a}{c}|11101\rangle \\
 & \left. +\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|11111\rangle\right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_6\rangle = & \frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}|00001\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|00011\rangle\right. \\
 & +|01000\rangle - \frac{a}{d}|10100\rangle \\
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|10110\rangle - \frac{a}{c}|11101\rangle \\
 & \left. -\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|11111\rangle\right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_7\rangle = & \frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}|00001\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|00011\rangle\right. \\
 & -|01000\rangle + \frac{a}{d}|10100\rangle \\
 & +\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|10110\rangle - \frac{a}{c}|11101\rangle \\
 & \left. -\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|11111\rangle\right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_8\rangle = & \frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}|00001\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2}|00011\rangle\right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -|01000\rangle - \frac{a}{d}|10100\rangle \\
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2}|10110\rangle + \frac{a}{c}|11101\rangle \\
 & \left. +\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}|11111\rangle\right)_{xya_1Aa_2},
 \end{aligned}$$

因此, 总的系统态可以表示为

$$|\Psi\rangle_{xya_1Aa_2b_1cb_2} = \sum_{i=1}^{32} |g_i\rangle_{xya_1Aa_2} |\varphi_i\rangle_{b_1cb_2}. \quad (4)$$

为了更加清楚的说明整个方案的过程, 我们选择其中一个测量基作为例子, 按照步骤逐步实现该方案. 不失一般性, 我们假设 Alice 的测量结果是 $|g_1\rangle_{xya_1Aa_2}$, 那么粒子 b_1cb_2 的塌陷态就可以表示为

$$\begin{aligned}
 |\varphi_1\rangle_{b_1cb_2} = & \frac{a}{2}(x_0|000\rangle + x_1|011\rangle \\
 & + x_2|110\rangle + x_3|101\rangle)_{b_1cb_2}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

由于纠缠交换的作用, Alice 要发送的量子信息已经被传递到 Bob 和 Charlie 的量子态中, 此时, 量子信息的分发过程已经完成. 也就是说, Bob 和 Charlie 中任何一个人不通过合作而单独对自己手中粒子进行局域测量都无法获得 Alice 要发送的量子信息. 对于 Alice 的不同测量结果, 对应有不同的塌陷态, 如表 1 所示. 如果 Alice 的测量结果是 $|g_i\rangle_{xya_1Aa_2}$, ($i = 1, 2, 3, \dots, 14, 15, 16$), 未知的量子态就可以成功的共享, 但是如果 Alice 的测量结果是 $|g_i\rangle_{xya_1Aa_2}$, ($i = 17, 18, 19, \dots, 30, 31, 32$), 未知态共享则失败.

第二步 不妨假设 Alice 想让 Bob 重构量子态信息, 如果 Charlie 同意帮助 Bob 重构量子态信息, 那么 Charlie 对自己手中的粒子做单粒子投影测量.

根据第一步中所假设的, Alice 的测量结果是 $|g_1\rangle_{xya_1Aa_2}$, 粒子 b_1cb_2 的塌陷态如 (5) 式所示, 为了重构初始的未知态, Charlie 用一组正交完备基对自己手中的粒子进行单粒子投影测量, 并公布测量结果. 我们所选取的正交完备基表示为 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$, 其中,

$$|+\rangle_c = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_c, \quad |-\rangle_c = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)_c.$$

如果 Charlie 进行单粒子投影测量后, 测量结果是 $|+\rangle$, 则粒子 b_1b_2 塌陷为

$$\begin{aligned}
 |\varphi'\rangle_{b_1b_2} = & \langle + | \varphi \rangle_{b_1b_2} \\
 = & \frac{a}{2\sqrt{2}}(x_0|00\rangle + x_1|01\rangle)
 \end{aligned}$$

$$+x_2|10\rangle+x_3|11\rangle)_{b_1b_2}. \quad (6)$$

如果 Charlie 进行单粒子投影测量后, 测量结果是 $|-\rangle$, 则粒子 b_1b_2 塌陷为

$$\begin{aligned} |\varphi'\rangle_{b_1b_2} &= \langle -|\varphi\rangle_{b_1b_2} \\ &= \frac{a}{2\sqrt{2}}(x_0|00\rangle-x_1|01\rangle \\ &\quad -x_2|10\rangle+x_3|11\rangle)_{b_1b_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

第三步 Bob 对自己手中的粒子做么正操作.

Alice 和 Charlie 将自己的测量结果通过经典信道告诉 Bob, Bob 得知测量结果后, 根据 Alice 和 Charlie 的测量结果, 对自己手中的粒子做相应的么正操作, 由于 Alice 和 Charlie 所选测量基的不同, 对应有多种不同情况, 每一种情况 Bob 所需要做的么正变换也不相同, 如表 2 所示将 Bob 对应要做的么正操作一一列出. 量子态共享方案得以成功实现.

表 1 Alice 不同测量结果所对应粒子 b_1cb_2 不同的塌陷态

Alice 的测量结果	粒子 b_1cb_2 的塌陷态	Alice 的测量结果	粒子 b_1cb_2 的塌陷态
$ g_1\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 000\rangle+x_1 011\rangle+x_2 110\rangle+x_3 101\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_9\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 110\rangle+x_1 101\rangle+x_2 000\rangle+x_3 011\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_2\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 000\rangle+x_1 011\rangle-x_2 110\rangle-x_3 101\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{10}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 110\rangle+x_1 101\rangle-x_2 000\rangle-x_3 011\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_3\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 000\rangle-x_1 011\rangle+x_2 110\rangle-x_3 101\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{11}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 110\rangle-x_1 101\rangle+x_2 000\rangle-x_3 011\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_4\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 000\rangle-x_1 011\rangle-x_2 110\rangle+x_3 101\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{12}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 110\rangle-x_1 101\rangle-x_2 000\rangle+x_3 011\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_5\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 011\rangle+x_1 000\rangle+x_2 101\rangle+x_3 110\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{13}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 101\rangle+x_1 110\rangle+x_2 011\rangle+x_3 000\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_6\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 011\rangle+x_1 000\rangle-x_2 101\rangle-x_3 110\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{14}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 101\rangle+x_1 110\rangle-x_2 011\rangle-x_3 000\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_7\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 011\rangle-x_1 000\rangle+x_2 101\rangle-x_3 110\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{15}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 101\rangle-x_1 110\rangle+x_2 011\rangle-x_3 000\rangle)_{b_1cb_2}$
$ g_8\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 011\rangle-x_1 000\rangle-x_2 101\rangle+x_3 110\rangle)_{b_1cb_2}$	$ g_{16}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$\frac{a}{2}(x_0 101\rangle-x_1 110\rangle-x_2 011\rangle+x_3 000\rangle)_{b_1cb_2}$

表 2 对应 Alice 及 Charlie 不同测量结果 Bob 所进行的么正操作

Alice 的测量结果	Charlie 的测量结果	Bob 所做的么正操作	Alice 的测量结果	Charlie 的测量结果	Bob 所做的么正操作
$ g_1\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes I_{b_2}$	$ g_1\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$
$ g_2\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes I_{b_2}$	$ g_2\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes \sigma_{zb_2}$
$ g_3\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes \sigma_{zb_2}$	$ g_3\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes I_{b_2}$
$ g_4\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$	$ g_4\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes I_{b_2}$
$ g_5\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes \sigma_{xb_2}$	$ g_5\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes i\sigma_{yb_2}$
$ g_6\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$	$ g_6\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes i\sigma_{yb_2}$
$ g_7\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes -i\sigma_{yb_2}$	$ g_7\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$
$ g_8\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes -i\sigma_{yb_2}$	$ g_8\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes \sigma_{xb_2}$
$ g_9\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes I_{b_2}$	$ g_9\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$i\sigma_{yb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$
$ g_{10}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$I_{b_1} \otimes I_{b_2}$	$ g_{10}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{zb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$
$ g_{11}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$-i\sigma_{yb_1} \otimes I_{b_2}$	$ g_{11}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$
$ g_{12}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$i\sigma_{yb_1} \otimes \sigma_{zb_2}$	$ g_{12}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes I_{b_2}$
$ g_{13}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$	$ g_{13}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes -i\sigma_{yb_2}$
$ g_{14}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$-i\sigma_{yb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$	$ g_{14}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$i\sigma_{yb_1} \otimes i\sigma_{yb_2}$
$ g_{15}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes -i\sigma_{yb_2}$	$ g_{15}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$-i\sigma_{yb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$
$ g_{16}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ +\rangle_c$	$i\sigma_{yb_1} \otimes i\sigma_{yb_2}$	$ g_{16}\rangle_{xya_1Aa_2}$	$ -\rangle_c$	$\sigma_{xb_1} \otimes \sigma_{xb_2}$

前面我们已经介绍了基于非最大纠缠五粒子 Cluster 态的任意两粒子量子态共享的方案, 这里还需要对其中的一些细节加以解释. 量子通信最重

要的属性就是安全, 安全性主要基于量子信道的安全. 本方案中用到了两个信道: 一个是量子信道, 另一个是经典信道. 对于经典信道, 量子密码中假设

它是公开的、抗干扰的、认证的,即窃听者只能窃听而不能篡改传输的消息.而对于量子信道,为了保证安全性,需要有一个窃听检测的过程.受到 Li 等人^[59,60]的启发,为了检测是否存在窃听者, Alice 制备两组诱导光子 (decoy photons) 序列,随机的从 $\{|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle\}$ 中产生.其中, $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 用 Z 基测量, $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 用 X 基测量.将两个序列分别发送给 Bob 和 Charlie,当 Alice 和 Bob 收到诱导光子序列以后,为了窃听检测, Alice 将分别告诉 Bob 和 Charlie 将要作为窃听检测使用的诱导光子的位置和所选取的测量基, Bob 和 Charlie 对各自的诱导光子做相应的测量,分别得到两组测量结果的序列.随后,双方分别将自己的测量结果告诉 Alice,通过提前设定的错误率的阈值来检测是否存在窃听者,确保量子信道的安全.

下面考虑来自参与者的内部窃听:我们假设 Charlie 是窃听者, Charlie 通过拦截 Alice 发送给 Bob 的信道粒子,然后再将自己准备好的一个纠缠粒子发送给 Bob.但由于 Charlie 不知道 Alice 的测量结果,因此发送给 Bob 的粒子处于错误的量子态, Bob 重构的未知信息也将不同于 Alice 所发送的信息.当 Alice 和 Bob 公开对比一小部分量子信息时,他们将会发现通信中存在着窃听行为.综上

所述,对于某些窃听攻击本方案是安全可靠的.

3 结论

本文提出了一个基于非最大纠缠五粒子 Cluster 态的任意两粒子量子态共享的方案.接收方 Bob 能以一定的概率恢复出发送方发送的初始量子信息,成功概率取决于这个非最大纠缠五粒子 Cluster 态的系数,概率为 $4|a|^2$.如果 $a = b = c = d = \frac{1}{2}$,则概率可达到 1.

我们知道传统的利用非最大纠缠态作为量子通道的量子态共享方案一般需要发送方进行 Bell 基测量,而接收方必须引入辅助粒子方可概率实现量子态的共享.在本方案中,为了更加方便接收方接收量子信息,发送方引入一个辅助粒子,接收方不需要引入辅助粒子,只需要做简单的么正操作,即可完成量子态共享.由于是发送方引入辅助粒子,因此 Alice 所用的测量基不是通常所用的 Bell 基来进行测量,必须是特殊的正交完备测量基.我们相信本方案对实际应用有很好的指导意义.

4 附录 A1

Alice 所用的测量基 $|g_i\rangle_{xya_1Aa_2}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 30, 31, 32$)

$$\begin{aligned}
 |g_1\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle + \frac{a}{b} |01001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle + \frac{a}{c} |10101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle + \frac{a}{d} |11100\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_2\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle + \frac{a}{b} |01001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle - \frac{a}{c} |10101\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle - \frac{a}{d} |11100\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_3\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle - \frac{a}{b} |01001\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle + \frac{a}{c} |10101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle - \frac{a}{d} |11100\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_4\rangle &= \frac{1}{2} \left(|00000\rangle - \frac{a}{b} |01001\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |01011\rangle - \frac{a}{c} |10101\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |10111\rangle + \frac{a}{d} |11100\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_5\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} |00001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |00011\rangle + |01000\rangle + \frac{a}{d} |10100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |10110\rangle + \frac{a}{c} |11101\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |g_6\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} |00001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |00011\rangle + |01000\rangle - \frac{a}{d} |10100\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |10110\rangle - \frac{a}{c} |11101\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_7\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} |00001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |00011\rangle - |01000\rangle + \frac{a}{d} |10100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |10110\rangle - \frac{a}{c} |11101\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_8\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} |00001\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |00011\rangle - |01000\rangle - \frac{a}{d} |10100\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |10110\rangle + \frac{a}{c} |11101\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_9\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c} |00101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00111\rangle + \frac{a}{d} |01100\rangle \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} + |10000\rangle + \frac{a}{b} |11001\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{10}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c} |00101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00111\rangle + \frac{a}{d} |01100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |01110\rangle - |10000\rangle - \frac{a}{b} |11001\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{11}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c} |00101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00111\rangle - \frac{a}{d} |01100\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |01110\rangle + |10000\rangle - \frac{a}{b} |11001\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{12}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c} |00101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00111\rangle - \frac{a}{d} |01100\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |01110\rangle - |10000\rangle + \frac{a}{b} |11001\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{13}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} |00100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00110\rangle + \frac{a}{c} |01101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01111\rangle + \frac{a}{b} |10001\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10011\rangle + |11000\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{14}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} |00100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00110\rangle + \frac{a}{c} |01101\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01111\rangle - \frac{a}{b} |10001\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10011\rangle - |11000\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{15}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} |00100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00110\rangle - \frac{a}{c} |01101\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01111\rangle + \frac{a}{b} |10001\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10011\rangle - |11000\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{16}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} |00100\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00110\rangle - \frac{a}{c} |01101\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01111\rangle - \frac{a}{b} |10001\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10011\rangle + |11000\rangle \right)_{xya_1Aa_2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |10011\rangle + |11000\rangle \Big)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{17}\rangle = & \frac{1}{2} \left(-|00010\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |01001\rangle - \frac{a}{b} |01011\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |10101\rangle - \frac{a}{c} |10111\rangle \right. \\
 & \left. + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |11100\rangle - \frac{a}{d} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{18}\rangle = & \frac{1}{2} \left(-|00010\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |01001\rangle - \frac{a}{b} |01011\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |10101\rangle + \frac{a}{c} |10111\rangle \right. \\
 & \left. - \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |11100\rangle + \frac{a}{d} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{19}\rangle = & \frac{1}{2} \left(-|00010\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |01001\rangle + \frac{a}{b} |01011\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |10101\rangle - \frac{a}{c} |10111\rangle \right. \\
 & \left. - \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |11100\rangle + \frac{a}{d} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{20}\rangle = & \frac{1}{2} \left(-|00010\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |01001\rangle + \frac{a}{b} |01011\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |10101\rangle + \frac{a}{c} |10111\rangle \right. \\
 & \left. + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |11100\rangle - \frac{a}{d} |11110\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{21}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |00001\rangle - \frac{a}{b} |00011\rangle - |01010\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |10100\rangle - \frac{a}{d} |10110\rangle \right. \\
 & \left. + \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |11101\rangle - \frac{a}{c} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{22}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |00001\rangle - \frac{a}{b} |00011\rangle - |01010\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |10100\rangle + \frac{a}{d} |10110\rangle \right. \\
 & \left. - \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |11101\rangle + \frac{a}{c} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{23}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |00001\rangle - \frac{a}{b} |00011\rangle + |01010\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |10100\rangle - \frac{a}{d} |10110\rangle \right. \\
 & \left. - \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |11101\rangle + \frac{a}{c} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{24}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |00001\rangle - \frac{a}{b} |00011\rangle + |01010\rangle - \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |10100\rangle + \frac{a}{d} |10110\rangle \right. \\
 & \left. + \sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |11101\rangle - \frac{a}{c} |11111\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{25}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |00101\rangle - \frac{a}{c} |00111\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |01100\rangle - \frac{a}{d} |01110\rangle - |10010\rangle \right. \\
 & \left. + \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |11001\rangle - \frac{a}{b} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{26}\rangle = & \frac{1}{2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2} |00101\rangle - \frac{a}{c} |00111\rangle + \sqrt{1-\left(\frac{a}{d}\right)^2} |01100\rangle - \frac{a}{d} |01110\rangle + |10010\rangle \right. \\
 & \left. - \sqrt{1-\left(\frac{a}{b}\right)^2} |11001\rangle + \frac{a}{b} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |g_{27}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00101\rangle - \frac{a}{c} |00111\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |01100\rangle + \frac{a}{d} |01110\rangle - |10010\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11001\rangle + \frac{a}{b} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{28}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |00101\rangle - \frac{a}{c} |00111\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |01100\rangle + \frac{a}{d} |01110\rangle + |10010\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |11001\rangle - \frac{a}{b} |11011\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{29}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00100\rangle - \frac{a}{d} |00110\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01101\rangle - \frac{a}{c} |01111\rangle \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10001\rangle - \frac{a}{b} |10011\rangle - |11010\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{30}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00100\rangle - \frac{a}{d} |00110\rangle + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01101\rangle - \frac{a}{c} |01111\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10001\rangle + \frac{a}{b} |10011\rangle + |11010\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{31}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00100\rangle - \frac{a}{d} |00110\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01101\rangle + \frac{a}{c} |01111\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10001\rangle - \frac{a}{b} |10011\rangle + |11010\rangle \right)_{xya_1Aa_2}, \\
 |g_{32}\rangle &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} |00100\rangle - \frac{a}{d} |00110\rangle - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} |01101\rangle + \frac{a}{c} |01111\rangle \right. \\
 &\quad \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} |10001\rangle + \frac{a}{b} |10011\rangle - |11010\rangle \right)_{xya_1Aa_2}.
 \end{aligned}$$

- [1] Bennett C H, Brassard G 1984 *Proc. IEEE Int. Conf. Computers, Systems and Signal Processing Bangalore, India* 175
- [2] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [3] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [4] Karlsson A, Bourennane M 1998 *Phys. Rev. A* **58** 4394
- [5] Yang C P, Chu S, Han S 2004 *Phys. Rev. A* **70** 022329
- [6] Deng F G, Li C Y, Li Y S, Zhou H Y, Wang Y 2005 *Phys. Rev. A* **72** 022338
- [7] Li X H, Deng F G, Zhou H Y 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1151
- [8] Zhou P, Li X H, Deng F G, Zhou H Y 2007 *J. Phys. A: Math. Theor.* **40** 13121
- [9] Zha X W, Song H Y 2007 *Phys. Lett. A* **369** 377
- [10] Zhu F C, Wen Q Y, Chen X B 2006 *Chin. Phys.* **15** 2240
- [11] Zheng Y Z, Guo G C, Gu Y J 2002 *Chin. Phys.* **11** 537
- [12] Zhang C M, Zha X W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1339 (in Chinese) [张淳民, 查新未 2008 物理学报 **57** 1339]
- [13] Zha X W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1875 (in Chinese) [查新未 2007 物理学报 **56** 1875]
- [14] Yang C P, Guo G C 1999 *Chin. Phys. Lett.* **16** 628
- [15] Ekert A K 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 661
- [16] Bennett C H 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3121
- [17] Bennett C H, Brassard G, Mermin N D 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 557
- [18] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [19] Deng F G, Long G L 2003 *Phys. Rev. A* **68** 042315
- [20] Deng F G, Long G L 2004 *Phys. Rev. A* **70** 012311
- [21] Hwang W Y 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 057901
- [22] Wang X B 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 230503
- [23] Lo H K, Ma X F, Chen K 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 230504
- [24] Li X H, Deng F G, Zhou H Y 2008 *Phys. Rev. A* **78** 022321
- [25] Deng F G, Liu X S, Ma Y J, Xiao L, Long G L 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 893
- [26] Long G L, Liu X S 2002 *Phys. Rev. A* **65** 032302
- [27] Deng F G, Long G L, Liu X S 2003 *Phys. Rev. A* **68** 042317
- [28] Deng F G, Long G L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 052319
- [29] Wang C, Deng F G, Li Y S, Liu X S, Long G L 2005 *Phys. Rev. A* **71** 044305
- [30] Long G L, Deng F G, Wang C, Li X H, Wen K, Wang W Y 2007 *Front. Phys. Chin.* **2** 251
- [31] Wang C, Deng F G, Long G L 2005 *Opt. Commun.* **253** 15

- [32] Li X H, Li C Y, Deng F G, Zhou P, Liang Y J, Zhou H Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 2149
- [33] Guo F Z, Qin S J, Wen Q Y, Zhu F C 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 090307
- [34] Bennett C H, Wiesner S J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2881
- [35] Liu X S, Long G L, Tong D M, Feng L 2002 *Phys. Rev. A* **65** 022304
- [36] Grudka A, Wojcik A 2002 *Phys. Rev. A* **66** 014301
- [37] Hillery M, Buzek V, Berthiaume A 1999 *Phys. Rev. A* **59** 1829
- [38] Karlsson A, Koashi M, Imoto N 1999 *Phys. Rev. A* **59** 162
- [39] Xiao L, Long G L, Deng F G, Pan J W 2004 *Phys. Rev. A* **69** 052307
- [40] Deng F G, Li X H, Zhou H Y 2008 *Phys. Lett. A* **372** 1957
- [41] Deng F G, Li X H, Li C Y, Zhou P, Zhou H Y 2005 *Phys. Rev. A* **72** 044301
- [42] Jin X R, Zhang S, Zhang Y Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 2252
- [43] Deng F G, Long G L, Chen P 2006 *Chin. Phys.* **15** 2228
- [44] Chen X B, Niu X X, Zhou X J, Yang Y X 2013 *Quantum Inf Process* **12** 365
- [45] Pati A K 2001 *Phys. Rev. A* **63** 014302
- [46] Bennett C H, DiVincenzo D P, Shor P W, Smolin J A, Terhal B M, Wootters W K 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 077902
- [47] Lo H K 2000 *Phys. Rev. A* **62** 012313
- [48] Cleve R, Gottesman D, Lo H K 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 648
- [49] Lance A M, Symun T, Bowen W P, Sanders B C, Lam P K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 177903
- [50] Li Y M, Zhang K S, Peng K C 2004 *Phys. Lett. A* **324** 420
- [51] Zhang Z J, Yang J, Man Z X, Li Y 2005 *Eur. Phys. J. D* **33** 133
- [52] Li X H, Zhou P, Li C Y, Zhou H Y, Deng F G 2006 *J. Phys. B* **39** 1975
- [53] Deng F G, Li X H, Li C Y, Zhou P, Zhou H Y 2006 *Eur. Phys. J. D* **39** 459
- [54] Man Z X, Xia Y J, An N B 2007 *Eur. Phys. J. D* **42** 333
- [55] Hou K, Li Y B, Shi S H 2010 *Optics Communications* **283** 1961
- [56] Nie Y Y, Li Y H, Liu J C, Sang M H 2011 *Opt. Commun.* **284** 1457
- [57] Chen X, Jiang M, Chen X P, Li H 2013 *Quantum Inf Process* **12** 2405
- [58] Briegel H J, Raussendorf R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 910
- [59] Li C Y, Zhou H Y, Wang Y, Deng F G 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1049
- [60] Li C Y, Li X H, Deng F G, Zhou P, Liang Y J, Zhou H Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2896

High-efficient quantum state sharing via non-maximally five-qubit cluster state*

Sun Xin-Mei[†] Zha Xin-Wei Qi Jian-Xia Lan Qian

(School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

(Received 4 July 2013; revised manuscript received 1 September 2013)

Abstract

In this paper we present a new scheme for quantum state sharing of an arbitrary unknown two-qubit state by using a non-maximally five-qubit cluster state as quantum channel. In this scheme, the non-maximally five-qubit cluster state is shared by a sender (Alice), a controller (Charlie), and a receiver (Bob), who does not need to introduce an auxiliary particle but only operates an appropriate unitary transformation. The sender introduces an auxiliary particle and makes orthogonal complete bases measurement, and the controller makes a single-particle projective measurement on his particle, then the quantum state sharing can be probabilistically realized.

Keywords: quantum state sharing, five-qubit cluster state, orthogonal complete bases measurement, single-particle projective measurement

PACS: 03.67.Hk, 03.67.-a, 03.65.-w

DOI: 10.7498/aps.62.230302

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10902083), and the Shaanxi Natural Science Foundation, China (Grant No. 2013JM1009).

[†] Corresponding author. E-mail: sunxinmei0915@163.com