

文章编号: 1000-5862(2014)04-0374-04

2 粒子未知态的受控分级量子通信

王作栋, 徐 玮, 黄亦斌*

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西 南昌 330022)

摘要: 提出了 1 个以 6 粒子团簇态为量子信道实现 2 粒子未知态的受控分级量子通信方案. 不同的接收者因其受发送者的信任程度不同而对未知态的恢复能力也不同. 发送者对手中的 3 个粒子做 1 次 von-Neumann 联合测量, 控制者根据不同的接收者或自己做局域测量或联合测量. 接收者收到 2 次测量结果后做相应的么正操作可恢复未知态, 完成本次的量子通信.

关键词: 6 粒子团簇态; 可控量子隐形传态; 量子信息分裂; 分级量子通信

中图分类号: O 431.2 **文献标志码:** A

0 引言

1993 年,量子隐形传态^[1]提出以来,从此这种由经典信道与 EPR 纠缠信道传送 1 个未知量子态的量子隐形传态已成为量子信息领域重要的研究课题之一,并取得了一系列有意义的结果^[2-9]. 然而,量子隐形传态不应仅仅局限于双方的量子隐形传态. 最近十几年,大量的多方量子隐形传态方案被提出:1999 年,Mark Hillery 等^[10]提出了 1 种量子信息分裂(quantum information splitting, QIS) 方案;2005 年邓富国等^[11]提出了一种对称性的多方可控量子隐形传态方案,实现了利用 GHZ 态传送 1 个任意 2 粒子纠缠态的结果;2008 年,S. Muralidharan 等^[12]提出了一种利用多粒子纠缠态实现量子信息分裂方案.

以上多方量子隐形传态的方案,对于量子信息的分裂都是对称的,即接收者对于量子信息的恢复能力是相同的. 2010 年,汪新文等^[13-15]提出量子信息不对称分裂的概念——分级量子信息分裂(hierarchical quantum information splitting, HQIS). 在该方案中,发送者 Alice 向在空间上互相独立的接收者(Bob, Charlie 和 Diana) 分配 1 个单比特的量子信息. 这些接收者对量子信息的恢复能力不同,高级接收者只需要部分参与人的协助就可以恢复 Alice 发送的未知态,而低级接收者需要该方案所有参与人的协助才能恢复 Alice 发送的未知态.

本文利用 1 个 6 粒子团簇态^[16]作为量子通信信道,实现了 2 粒子未知态的量子通信方案. 发送者 Alice 对接收者 Bob 和 Charlie 的信任程度是不同的,使得他们对于恢复未知态的能力不同. Bob 比 Charlie 更受 Alice 的信任,所以在该方案中 Bob 比 Charlie 更容易接收到 2 粒子未知态. 控制者 Diana 不具备接收未知态的能力,她根据 Alice 的指示将测量结果发送给相应的接收者,她的职责是控制和协助接收者恢复未知态. 发送者 Alice 对她手中的粒子和未知态粒子做 1 次 von-Neumann 联合测量^[17]. 高级接收者 Bob 再只需控制者 Diana 的协助,对自己拥有的 2 个粒子做相应的么正操作可恢复 Alice 发送的量子信息,而低级接收者 Charlie 则需要所有人的协助并对自己拥有的 2 个粒子做相应的么正操作才能够恢复 Alice 发送的量子信息.

1 分级量子通信

Alice 想要传输 1 个 2 粒子未知态 $|\psi_s\rangle$, 这个 2 粒子未知态为

$$|\psi_s\rangle = \alpha|01\rangle + \beta|10\rangle, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (1)$$

首先 Alice 制备大量 6 粒子团簇态

$$|\psi_c\rangle = (|0\rangle_A |\psi_0\rangle_{BCD} + |1\rangle_A |\psi_1\rangle_{BCD}) / \sqrt{2}, \quad (2)$$

其中 $|\psi_0\rangle_{BCD} = (|0000\rangle + |0111\rangle) / \sqrt{2}$, $|\psi_1\rangle_{BCD} = (|1000\rangle - |1111\rangle) / \sqrt{2}$. 此时 2 粒子未知量子态与 6 粒子团簇态所构成总量子体系为

收稿日期: 2014-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61265001)和江西省教育厅 2010 年基金(GJJ10399)资助项目.

通信作者: 黄亦斌(1973-),男,湖南桃江人,副教授,博士,主要从事量子信息与量子计算的研究.

$$|\Psi_{sc}\rangle = |\psi_s\rangle \otimes |\psi_c\rangle = (\alpha|01\rangle + \beta|10\rangle) \otimes (|0\rangle_A |\psi_0\rangle_{BCD} + |1\rangle_A |\psi_1\rangle_{BCD}) / \sqrt{2} = (\alpha|010\rangle \cdot |\psi_0\rangle + \alpha|011\rangle |\psi_1\rangle + \beta|100\rangle |\psi_0\rangle + \beta|101\rangle \cdot |\psi_1\rangle) / \sqrt{2}. \quad (3)$$

Alice 作为发送者,她把每一个团簇态的第 1 个粒子留在自己手中;第 2、3 个粒子发送给 Bob;第 4、5 个粒子发送给 Charlie;第 6 个粒子发送给 Diana. 为了实现量子通信,发送者 Alice 对她手中的 3 个粒子在基为 $|\xi_i^\pm\rangle (i = 1, 2, 3, 4)$ 下执行 1 次 3 粒子

von-Neumann 联合测量. 3 粒子纠缠的完备基为 $|\xi_1^\pm\rangle = (|000\rangle \pm |111\rangle)$, $|\xi_2^\pm\rangle = (|001\rangle \pm |110\rangle) / \sqrt{2}$, $|\xi_3^\pm\rangle = (|010\rangle \pm |101\rangle)$, $|\xi_4^\pm\rangle = (|011\rangle \pm |100\rangle) / \sqrt{2}$.

Alice 做完测量后, Bob、Charlie 和 Diana 三者的粒子联合塌缩态可能为 $|\Psi^\pm\rangle_{BCD} = \alpha |\psi_0\rangle_{BCD} \pm \beta |\psi_1\rangle_{BCD}$ 和 $|\Phi^\pm\rangle_{BCD} = \alpha |\psi_1\rangle_{BCD} \pm \beta |\psi_0\rangle_{BCD}$. 结果见表 1.

表 1 Alice 的测量结果及 Bob、Charlie 和 Diana 手中粒子的塌缩态

Alice 的测量结果	Bob、Charlie 和 Diana 手中粒子的塌缩态
$ \xi_3^+\rangle = (010\rangle + 101\rangle) / \sqrt{2}$	$(\alpha 00000\rangle + \alpha 01111\rangle + \beta 10000\rangle - \beta 11111\rangle) / \sqrt{2}$
$ \xi_3^-\rangle = (010\rangle - 101\rangle) / \sqrt{2}$	$(\alpha 00000\rangle + \alpha 01111\rangle - \beta 10000\rangle + \beta 11111\rangle) / \sqrt{2}$
$ \xi_4^+\rangle = (011\rangle + 100\rangle) / \sqrt{2}$	$(\alpha 10000\rangle - \alpha 11111\rangle + \beta 00000\rangle + \beta 01111\rangle) / \sqrt{2}$
$ \xi_4^-\rangle = (011\rangle - 100\rangle) / \sqrt{2}$	$(\alpha 10000\rangle - \alpha 11111\rangle - \beta 00000\rangle - \beta 01111\rangle) / \sqrt{2}$

1.1 发送者把未知态发送给高级接收者

发送者 Alice 把她的测量结果通过经典信道发送给 Bob 和 Diana. 控制者 Diana 收到 Alice 的信息后对手中的粒子在基 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 下做 1 次测量, 并把她的测量结果通过经典信道发送给 Bob. Bob 根据接收到的 2 个测量结果, 经过适当的么正操作就可以重构 2 粒子未知态 $|\psi_s\rangle$. 详细测量结果, 测量后的塌缩态, 接收者所要做的么正操作见表 2.

表 2 Alice、Diana 的测量结果, Bob 手中粒子的塌缩态及 Bob 所需要的么正操作

A 的测量结果	D 的测量结果	B 手中粒子的塌缩态	B 的么正操作
$ \xi_3^+\rangle$	$ 0\rangle$	$\alpha 00\rangle + \beta 10\rangle$	U_B^1
$ \xi_3^+\rangle$	$ 1\rangle$	$\alpha 01\rangle - \beta 11\rangle$	U_B^2
$ \xi_3^-\rangle$	$ 0\rangle$	$\alpha 00\rangle - \beta 10\rangle$	U_B^3
$ \xi_3^-\rangle$	$ 1\rangle$	$\alpha 01\rangle + \beta 11\rangle$	U_B^4
$ \xi_4^+\rangle$	$ 0\rangle$	$\alpha 10\rangle + \beta 00\rangle$	U_B^5
$ \xi_4^+\rangle$	$ 1\rangle$	$-\alpha 11\rangle + \beta 01\rangle$	U_B^6
$ \xi_4^-\rangle$	$ 0\rangle$	$\alpha 10\rangle - \beta 00\rangle$	U_B^7
$ \xi_4^-\rangle$	$ 1\rangle$	$-\alpha 11\rangle - \beta 01\rangle$	U_B^8

Bob 在基 $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ 下, 所要做的么正操作分别为

$$U_B^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_B^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_B^3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_B^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_B^5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_B^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_B^7 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_B^8 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

1.2 发送者把未知态发送给低级接收者

如果发送者 Alice 把 2 粒子未知态发送给低级接收者 Charlie, 那么她要把测量结果通过经典信道发送给 Bob、Charlie 和 Diana. 然后, Bob 和 Diana 在基 $|\xi_i^\pm\rangle (i = 1, 2, 3, 4)$ 下执行 1 次 3 粒子 von-Neumann 联合测量, 并把联合测量结果通过经典信道也发送给 Charlie. Charlie 收到 2 次测量结果后经过适当的么正操作可重构 2 粒子未知态 $|\psi_s\rangle$.

如果 Alice 测量结果为 $|\xi_3^+\rangle = (|010\rangle + |101\rangle) / \sqrt{2}$, Bob 与 Diana 的联合测量结果, Charlie 手中粒子的塌缩态及 Charlie 所需要做的么正操作见表 3. 对于 Alice 的其它测量结果, 情况完全类似, 不一一列举.

表3 Alice、Bob 和 Diana 的测量结果 Charlie 手中粒子的塌缩态及么正操作

A 的测量结果	B 和 D 联合测量结果	C 手中粒子塌缩态	C 的么正操作
$ \xi_3^+\rangle$	$ \xi_1^-\rangle$	$\alpha 00\rangle + \beta 11\rangle$	U_C^1
$ \xi_3^+\rangle$	$ \xi_1^+\rangle$	$\alpha 00\rangle - \beta 11\rangle$	U_C^2
$ \xi_3^-\rangle$	$ \xi_4^+\rangle$	$\alpha 11\rangle + \beta 00\rangle$	U_C^3
$ \xi_3^-\rangle$	$ \xi_4^-\rangle$	$\alpha 11\rangle - \beta 00\rangle$	U_C^4

Charlie 在基 $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ 下, 所要做的么正操作分别为

$$U_C^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, U_C^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$U_C^3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, U_C^4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

如果 Charlie 想要重构 Alice 发送的 2 粒子未知态就必须有 Bob 和 Diana 的协助, 否则她是不可能成功的, 而 Bob 重构未知态不需要 Charlie 的协助. 因此, Charlie 对于恢复未知态的能力是弱于 Bob 的, Bob 与 Charlie 在接收未知态的能力上处在不同的等级上, 而 2 者在接收未知态时又都受到 Diana 的控制. 故而, 这是一种受控分级量子通信方案.

2 结论

本文探讨了 1 个利用 6 粒子团簇态实现 2 粒子未知态的分级量子通信方案. 在该方案中, 发送者 Alice 与接收者 Bob、Charlie 和控制者 Diana 共享 1 个 6 粒子团簇态. 根据他们对 2 粒子未知态的恢复能力的不同, 接收者 Bob 为高级接收者, 接收者 Charlie 为低级接收者, 控制者 Diana 不具备接收量子信息的能力. 发送者 Alice 对她手中的 3 个粒子做 1 次 von-Neumann 联合测量. 如果 Alice 想把 2 粒子未知态量子信息发送给接收者 Bob, 她只需要通过经典信道把测量结果发送给 Bob 和 Diana, Diana 对自己拥有的粒子做 1 次测量, 并把结果通过经典信道发送给 Bob. Bob 根据收到的 2 次测量结果经过相应的么正操作就可重构 Alice 要传送的 2 粒子未知态. 如果 Alice 想把该 2 粒子未知态发送给 Charlie, Alice 需要把她的测量结果发送给 Bob, Charlie 和 Diana, 然后 Bob 和 Diana 需要做 1 次联合测量, 并把测量结果通过经典信道发送给 Charlie, Charlie 根据

2 次的测量结果做相应的么正操作, 才能重构 Alice 要传送的 2 粒子未知态.

3 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]. Phys Rev Lett, 1993, 70: 1895-1899.
- [2] Bouwmeester D, Pan Jianwei, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation [J]. Nature, 1997, 390: 575-579.
- [3] Van Enk S J, Hirota O. Entangled coherent states: teleportation and decoherence [J]. Phys Rev A, 2001, 64: 22313.
- [4] Shi Baosen, Jiang Yunkun, Guo Guangcan. Probabilistic teleportation of two-particle entangled state [J]. Phys Lett A, 2000, 268(3): 161-164.
- [5] Cao Zhuoliang, Yang Ming, Guo Guangcan. The scheme for realizing probabilistic teleportation of atomic states and purifying the quantum channel on cavity QED [J]. Phys Lett A, 2003, 308(5/6): 349-354.
- [6] 郑亦庄, 戴玲玉, 郭光灿. 三粒子纠缠 W 态的隐形传态 [J]. 量子电子学报, 2004, 21(6): 730-733.
- [7] 洪智慧, 聂义友, 李嵩松, 等. 四粒子团簇态的量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 459-562.
- [8] Zhao Zhi, Chen Yu'ao, Ning Anning, et al. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. Nature, 2004, 430: 54-58.
- [9] Yin Juan, Ren Jingang, Lu He, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. Nature, 2012, 488: 185-188.
- [10] Hillery M, Buzek V, Berthiaume A, et al. Quantum secret sharing [J]. Physical Review A, 1999, 59: 1829-1834.
- [11] Deng Fuguo, Li Chunyan, Li Yansong, et al. Symmetric multiparty-controlled teleportation of an arbitrary two-particle entanglement [J]. Phys Rev A, 2005, 72: 22338-22345.
- [12] Muralidharan S, Panigrahi P K. Quantum information splitting using multipartite cluster states [J]. Phys Rev A, 2008, 78: 62333.
- [13] Wang Xinwen, Xia Lixin, Wang Zhiyong, et al. Hierarchical quantum-information splitting [J]. Opt Comm, 2010, 283(6): 1196-1199.
- [14] Wang Xinwen, Zhang Dengyu, Tang Shiqing, et al. Multiparty hierarchical quantum-information splitting [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2011, 44: 35505.
- [15] Wang Xinwen, Zhang Dengyu, Tang Shiqing, et al. Hierar-

chical quantum information splitting with six-photon cluster states [J]. Inter J Theor Phys 2010 49: 2691-2697.

[16] Briegel H J, Raussendorf R. Persistent entanglement in arrays of interacting particles [J]. Phys Rev Lett 2001 86:

910-913.

[17] 肖仕敏, 李渊华, 桑明煌, 等. 基于 5 粒子团簇态实现 2 粒子未知态的量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2012 36(4): 370-372.

Controlled Hierarchical Quantum Communication of an Unknown Two-Qubit Entangled State

WANG Zuo-dong, XU Wei, HUANG Yi-bin*

(College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: A scheme of controlled hierarchical quantum information of an unknown two-qubit entangled state by using a six-qubit cluster state as the quantum channel is proposed. Because of their different level of trust by the sender, different receivers have different ability to recover the unknown state. The sender needs to perform a joint von-Neumann measurement on her three qubits, controller according to different receivers take a local measurement or a joint measurement. After received the two measurements, the receiver can reconstruct the unknown state by performing appropriate unitary operations, then this controlled hierarchical quantum communication is accomplished.

Key words: six-qubit cluster state; controlled teleportation; quantum information splitting; hierarchical quantum communication

(责任编辑: 冉小晓)

(上接第 361 页)

The Application Research of the BP Neural Network in Electronic Nose Classification and Recognition with Different Brands Liquor

CHEN Xiu-li¹, ZHAO Ai-juan¹, WEI Shi-qian²

(1. School of Chemistry, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou He-nan 450000, China;

2. The Editorial Department of Journal, Xuchang University, Xuchang He-nan 450000, China)

Abstract: Based on the sensors array made up of MQ3, MQ4, TGS813, TGS2620 four metal oxide semiconductor sensors which are cross sensitive to alcohol gas and organic, the real-time data acquisition was established in this paper, and the method of the steady and dynamic characteristic value extraction was proposed. Combined with BP neural network recognition, three kinds of liquor were conducted classification experiments by the electronic nose system. The results show that the recognition rate of electronic nose system is up to 90.0% under the steady characteristic and 83.3% under the dynamic characteristic for the different brands of liquor.

Key words: electronic nose; liquor detection; sensor array; BP neural network; recognition rate

(责任编辑: 刘显亮)