

文章编号:1000-5862(2013)05-0497-03

基于4粒子团簇态实现量子态的双向通信

杨幼凤¹, 叶志清^{1, 2*}

(1. 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022; 2. 江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要:提出了一个用4粒子团簇态作为量子信道传输量子态信息以实现双向通信的方案. 在该方案中, 通信双方 Alice 和 Bob 事先共享一个4粒子团簇态. 在通信过程中: 首先, 将4粒子团簇态与双方要传递的量子态信息共同构成系综态; 然后, Alice 和 Bob 分别对自己拥有的部分粒子作 Bell 基的联合测量, 并把测量结果通过经典信道告诉对方; 最后, Alice 和 Bob 根据对方公布的测量结果, 作相应的么正变换, 就可以在自己的粒子上重现对方要传送的量子态信息. 这样就达到了实现量子态的双向通信的目的.

关键词:4粒子团簇态; 量子态信息; 双向通信

中图分类号: TN 918

文献标志码: A

0 引言

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, 它是近20年发展起来的新型交叉学科, 是量子论和信息论相结合的新的研究领域, 主要包括量子秘密共享、量子密钥分配、量子安全直接通信和量子隐形传态, 其中量子隐形传态(QT)是目前量子通信中最引人注目的课题之一. 量子隐形传态方案最早是由 C. H. Bennett 等^[1]提出的, 在此方案中用2粒子最大纠缠态作为量子信道, 将未知量子态从一个地方隐形传送到另一个地方, 从此人们对量子态的隐形传输产生了极大的兴趣, 开创了量子隐形传态研究的先河. 随后, 越来越多的研究工作者投入其中. 1997年, 奥地利的 Zeilinger 小组在实验上成功实现了单光子态的隐形传输^[2]. 近年来, 人们又提出了许多传送未知量子态的可行方案, 如单个S能级粒子态的隐形传态^[3]、2粒子态的隐形传态^[4]、多粒子态的隐形传态^[5-8], 以及受控的量子隐形传态^[9-11]等. 这些主要讨论的是量子信息态的单向传递, 即只能从 Alice 传递量子态信息到 Bob 或从 Bob 传递量子态信息到 Alice, 也意味着通信双方不能同时通信. 这样的单向通信不能满足现实生活中通信的客观要求, 如果要进行双向通信, 必须再添加一个量子通道, 但通信成本会明显提高.

因此, 本论文针对这一问题, 提出了一个以4粒子团簇态作为量子通道, 实现量子态信息的双向通信的方案. 整个通信过程中只用到一个量子信道, 操作简便且花费小.

1 量子态的双向通信基本原理

在通信系统中, Alice 拥有3个粒子(A_1, A_2, A), Bob 拥有3个粒子(B_1, B_2, B), 其中 Alice 的2粒子 A_1, A_2 和 Bob 的2粒子 B_1, B_2 共同构成一个4粒子团簇态 $|\psi\rangle_{A_1 B_1 A_2 B_2}$, 通信双方 Alice 和 Bob 要把自己的量子态信息 $|\xi\rangle_A, |\eta\rangle_B$ 分别传给对方, 以实现双向通信, 方案如图1所示.

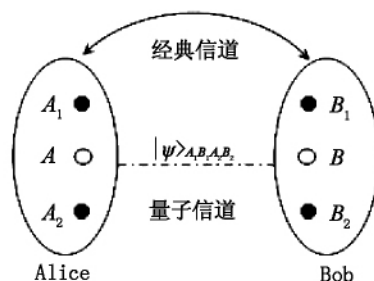


图1 量子态的双向通信方案原理图

Alice 和 Bob 的通信原理为: Alice 要传送的量子态信息为 $|\xi\rangle_A = (a_0|0\rangle + a_1|1\rangle)_A$, Bob 要传送的量子态信息为 $|\eta\rangle_B = (b_0|0\rangle + b_1|1\rangle)_B$, 其

收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61368001), 江西省自然科学基金(20114BAB202003)和江西省教育厅科技课题(GJJ10401)资助项目.

通信作者: 叶志清(1960-), 男, 浙江建德人, 教授, 主要从事光量子通信和光电子器件的研究.

中 $a_0^2 + a_1^2 = 1$ $b_0^2 + b_1^2 = 1$. 最大纠缠 Bell 态为 $|\phi^\pm\rangle = (|00\rangle \pm |11\rangle)/\sqrt{2}$, $|\varphi^\pm\rangle = (|01\rangle \pm |10\rangle)/\sqrt{2}$. $\sigma^i = \{\sigma_I, \sigma_Z, \sigma_X, \sigma_Y\}$ $i = 0, 1, 2, 3$.

在通信系统中 A 粒子 A_1, B_1, A_2, B_2 最大纠缠团簇态构成的量子信道为

$$|\psi\rangle_{A_1B_1A_2B_2}^E = (|0000\rangle + |0011\rangle + |1100\rangle + |1111\rangle)_{A_1B_1A_2B_2}/2. \quad (1)$$

整个通信系统构成的系综态为

$$\begin{aligned} |\Psi_s\rangle = & |\xi\rangle_A^I \otimes |\psi\rangle_{A_1B_1A_2B_2} \otimes |\eta\rangle_B^I = \\ & (a_0b_0(|000000\rangle + |000110\rangle + |011000\rangle + \\ & |011110\rangle) + a_0b_1(|000001\rangle + |000111\rangle + \\ & |011001\rangle + |011111\rangle) + a_1b_0(|100000\rangle + \\ & |100110\rangle + |111000\rangle + |111110\rangle) + \\ & a_1b_1(|100001\rangle + |100111\rangle + |111001\rangle + \\ & |111111\rangle))_{AA_1B_1A_2B_2}/2. \end{aligned} \quad (2)$$

Alice 对自己的 2 粒子 (A, A_1) 作贝尔基的联合测量(BSM), 设测量基为 $|\phi^\pm\rangle_{AA_1}$, 则测量结果为

$$|\psi_1\rangle = (a_0b_0(|0000\rangle + |0110\rangle) + a_0b_1(|0001\rangle +$$

$$|0111\rangle) + a_1b_0(|1000\rangle + |1110\rangle) + a_1b_1(|1001\rangle + |1111\rangle))_{B_1A_2B_2B}/\sqrt{2}. \quad (3)$$

然后 Bob 对自己拥有的 2 个粒子 (B, B_2) 作贝尔基的联合测量(BSM), 设测量基为 $|\phi^\pm\rangle_{B_2B}$, 则测量结果为

$$\begin{aligned} |\psi_2\rangle = & (a_0b_0|00\rangle + a_0b_1|01\rangle + a_1b_0|10\rangle + \\ & a_1b_1|11\rangle)_{B_1A_2} = (a_0|0\rangle + a_1|1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0|0\rangle + \\ & b_1|1\rangle)_{A_2} = |\xi\rangle_{B_1}^I \otimes |\eta\rangle_{A_2}^I. \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式得出, Alice 和 Bob 均只需要对测量结果作么正变换 σ_i , Alice 的 A 粒子的量子态信息就在 B_1 上重现, Bob 的 B 粒子的量子态信息在 A_2 上重现, 这样就达到了双向通信的目的.

2 结果及安全性分析

Alice 拥有 4 个不同的 Bell 测量基, Bob 也有 4 个不同的 Bell 测量基, 那么共有 16 个测量结果, 具体如表 1 所示.

表 1 Alice 测量结果及相应的塌缩态、么正变换

Alice、Bob 的测量结果	相应的塌缩态	对应的么正变换
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle + a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^0 \sigma_{A_2}^0$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle + a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^0 \sigma_{A_2}^1$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle + a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle + b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^0 \sigma_{A_2}^2$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle + a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle - b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^0 \sigma_{A_2}^3$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle - a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^1 \sigma_{A_2}^0$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle - a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^1 \sigma_{A_2}^1$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle - a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle + b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^1 \sigma_{A_2}^2$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_0 0\rangle - a_1 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle - b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^1 \sigma_{A_2}^3$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle + a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^2 \sigma_{A_2}^0$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle + a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^2 \sigma_{A_2}^1$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle + a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle + b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^2 \sigma_{A_2}^2$
$ \phi^+\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle + a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle - b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^2 \sigma_{A_2}^3$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle - a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle + b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^3 \sigma_{A_2}^0$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle - a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_0 0\rangle - b_1 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^3 \sigma_{A_2}^1$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^+\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle - a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle + b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^3 \sigma_{A_2}^2$
$ \phi^-\rangle_{AA_1} \phi^-\rangle_{B_2B}$	$(a_1 0\rangle - a_0 1\rangle)_{B_1} \otimes (b_1 0\rangle - b_0 1\rangle)_{A_2}$	$\sigma_{B_1}^3 \sigma_{A_2}^3$

从表 1 可以得出, 共有 16 种不同的测量结果. 量子通信的安全性^[11] 一直以来受到人们的广泛关注, 因此非常有必要对该双向通信方案的安全性进行分析. 在量子信道上传送的量子态, 对任何人来说都是未知的. 根据量子力学的不可克隆原理, 未知量子态是不可克隆的. 而且, 如果在量子信道上传送的量子态被攻击者攻击改变, 则结果将被改变, 这表明攻击者的行为能被发现. 如果攻击者窃听量子态信息, 则纠缠态的纠缠性一定会被破坏, 因此量子态不能传递到目的地. 由此可知, 量子态在量子信道上的

传递是保密的、安全的.

3 结论

本文提出了一个由通信双方 Alice 和 Bob 共享的 4 粒子团簇态作为量子信道进行量子态信息双向传递的方案. 在该方案中, 首先 A 粒子团簇态和通信双方要传送的量子态信息构成系综态; 然后, 通信双方 Alice 和 Bob 分别对已有的部分粒子作 Bell 基的联合测量, 并把测量结果通过经典信道告诉对方.

最后,Alice和Bob根据对方公布的测量结果,作相应的么正变换,就可以在自己的粒子上重现对方要传送的量子态信息.这样就实现了量子态的双向通信.根据量子力学的不可克隆原理、测不准规律,量子态的传递是保密、安全的.因为,如果一旦被窃听者攻击,纠缠态的纠缠性就会被破坏,将能发现并摒弃此次通信.与以往的量子态信息单向隐形传态相比,不仅节约成本,通信简单,而且更贴近真实通信,对实现量子通信具有一定的参考价值.

4 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] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 1997, 390:575-579.
- [3] Zhou Jindong, Zhang Yongde. Teleportation scheme of S -level quantum pure states by two-level EPRs [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(1):4095-4101.
- [4] Ye Liu, Yao Chunmei, Guo Guangcan. Teleportation of two-particle entangled state [J]. *Chinese Physics*, 2001, 10(11):1001-1003.
- [5] Yao Chunmei. Multi-atom teleportation through GHZ States [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(6):647-649.
- [6] 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.
- [7] 徐建刚, 查新未. N 粒子量子态的隐形传送的理论分析[J]. *量子光学学报*, 2009, 15(4):325-328.
- [8] 高火贵, 桑明煌. 基于5粒子纠缠态实现单粒子任意态的量子信息共享[J]. *江西师范大学学报:自然科学版*, 2011, 35(2):155-160.
- [9] 洪智慧, 聂义友, 黄亦斌, 等. 基于4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.
- [10] 邹昕, 叶志清. 基于三方秘密共享4粒子团簇态实现三比特量子态的可控隐形传态[J]. *江西师范大学学报:自然科学版*, 2012, 36(3):263-266.
- [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] Wang Xiaoguang. Quantum teleportation of entangled coherent states [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(2):22302.

To Realize Two-Way Communication of Quantum State Via Four-Qubit Cluster State

YANG You-feng¹, YE Zhi-qing^{1,2*}

(1. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China;

2. Key Laboratory of Photoelectronics & Telecommunication of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: A scheme of using four-qubit cluster state as quantum channel (QC) to convey the quantum state information is proposed to realize two-way communication. In this scenario, two sides of communication, Alice and Bob, share a four-qubit cluster state. In the process of communication, at first, four-qubit cluster state form a whole system with quantum state information two sides have. Then, Alice and Bob perform Bell-state joint measurements to their own part qubits respectively and tell the measured results to each other via classical channel (CC). Finally, according to the measured results, Alice and Bob make corresponding unitary transformations, hence its own party can reappear the opposite quantum state information. So two-way communication of quantum state information is achieved.

Key words: four-qubit cluster state; quantum state information; two-way communication

(责任编辑:冉小晓)