

## 量子隐形传态网络的广播与组播\*

周小清 邬云文†

(吉首大学物理系, 吉首 416000)

(2011年12月30日收到; 2012年2月16日收到修改稿)

给出了广播与组播的物理原理. 当 Alice 需要发送信息时, 就向与自己相连的交换机发送一连接请求信号, 交换机收到连接请求信号后通过检测目的地址判断是点到点的通信还是组播与广播; 若目的地址是 A 类、B 类或 C 类地址, 则进行点到点的通信操作; 若目的地址是 D 类地址或是有特殊意义的地址 (本地网络/指定网络广播), 则启动量子信息的广播与组播操作. 广播与组播时的保真度随受话终端数的增加而减小, 其极限为  $2/3$ .

**关键词:** 隐形传态, 互联网, 广播, 组播

**PACS:** 03.67.Hk, 42.50.Ex, 89.70.-a

## 1 引言

利用微观粒子的状态表示的信息叫量子信息, 量子信息学是物理学与信息科学交叉的前沿学科, 主要研究微观粒子量子态的操控与传送. 由于微观粒子的量子态具有相干性、纠缠性、叠加性和不可克隆等特性, 使量子信息具有经典信息不可比拟的优势. 例如利用微观粒子的量子态叠加及相干特性能够实现量子计算机超高速并行计算, 利用微观粒子的量子态纠缠能够实现超高速的信息传送, 利用量子态不可克隆的力学特性实现不可破译不可窃听的保密通信等.

量子通信技术按其传送的是经典信息还是量子信息而分为二类, 前者叫做量子密钥分配, 主要用于传送量子密钥, 实现不可破译的保密通信; 后者叫隐形传态, 是一种经典通信无法比拟的瞬间传输技术. 该技术是由 Bennett 等不同国家的六位科学家在 1993 年提出<sup>[1]</sup>, 并于 1997 年由 Bouwmeester 等人于利用纠缠光子对作为量子信道首次实现<sup>[2]</sup>. 量子隐形传态一经提出, 便引起了各国科学家的广泛关注并激发了极大的研究兴

趣. 在不长的时间里,  $S$  能级的量子隐形传态<sup>[3]</sup>, 多个粒子的量子隐形传态<sup>[4]</sup>, 连续变量的量子隐形传态<sup>[5]</sup>, 受控量子隐形传态<sup>[6]</sup>, 无需 Bell 基测量的隐形传态<sup>[7]</sup> 等相继被提出.

近几年来, 量子隐形传态也倍受我国科研工作者的重视, 不少科技工作者为此做了大量的工作. 何锐等通过对双模压缩真空态中的系统施行粒子数 - 相位联合测量, 制备出两体系统的纠缠源, 从而实现量子隐形传态<sup>[8]</sup>, 印娟等对远距离量子通信中的高维纠缠源进行了研究<sup>[9]</sup>, 周南润等人给出了基于纠缠的选择自动重传的量子同步通信协议<sup>[10]</sup>, 杨小琳等人设计了基于量子隐形传态的数据链路层选择重传协议<sup>[11]</sup>, 还有 Zheng, Li 等人分别对量子通信进行了研究<sup>[12,13]</sup>.

利用二粒子间的纠缠进行通信只能实现点对点的通信, 而在现实社会中人们往往需要实现组播和广播, 这就需要制备多粒子纠缠态, 所以促使人们研究多粒子纠缠的制备方法. 在 1999—2001 年间, 潘建伟等人已在实验室实现了三粒子纠缠<sup>[14,15]</sup> 与四粒子纠缠<sup>[16,17]</sup>, 并在 2004 年实现了五光子纠缠<sup>[18]</sup>. 利用这种多光子纠缠技术, Karls-son 等人提出了可控三粒子隐形传态方案<sup>[19]</sup>, 2007

\* 湖南省自然科学基金 (批准号: 11JJ3003) 和湖南省科技计划 (批准号: 2010FJ3081) 资助的课题.

† E-mail: wuyw\_jd@163.com

年周小清等人还设计出了三粒子纠缠  $W$  态令牌总线通信网络方案<sup>[20]</sup>. 2009年, 赵晗等人提出了基于腔 QED 技术的多用户间的多原子  $W$  态和 GHZ 态量子信道的建立方案, 并研究了制备远程多光子 GHZ 纠缠态, 利用所提方案可以用光子建立多用户间的量子信道<sup>[21,22]</sup>; 1999年, Murao 等人提出了把量子隐形传态和最佳普适量子克隆结合起来的量子远程克隆方案<sup>[23]</sup>, 利用该方案可以实行“一对多”的量子信息的传送; 2011年, 周小清等人研究了量子通信网络的互联与路由策略<sup>[24]</sup>, 但在该文中只研究了点对点的通信方式, 对于网络的广播与组播还没有研究. 然而, 现代的网络通信中, 除点对点的通信外, 组播与广播的应用也非常广泛, 例如开视频会议, 网络讨论等. 本文将在我们前期研究的基础上研究网络的广播与组播的实现方法.

## 2 多用户间量子信道的建立

对于量子隐形传态网络, 其量子信息通过量子信道传输, 测量信息通过经典信道传输. 在网络空闲时, 各相邻设备间均需建立电路连结和量子连结 (共享 EPR 对), 当然, 其量子连结也可在需要时才进行连结.

当 Alice 希望同  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  通话时, 她就向交换机发出连接请求信号, 该请求信号中必须包含各受话对象 ( $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$ ) 的地址和源地址. 交换机收到连接请求后, 根据该信号中的地址确定受话对象并向各受话对象发出连接指示; 各受话对象收到交换机的连接指示信号后, 若同意受话, 则向交换机回应一个连接响应信号; 交换机收到各受话对象的连接响应信号后, 将其持有的  $m$  个粒子与腔场作用, 依次对各个粒子直接测量, 便可以在  $m$  个用户之间建立量子信道 ( $m$  粒子的纠缠 GHZ 态)<sup>[21,22]</sup>.

## 3 量子信息的复制 (1 - $m$ 量子克隆)

多用户间的量子信道建立后, 就可以进行量子信息的传送. 当然, 要实现量子信息的传送, 量子态的大量复制是不可避免的. 而根据量子不可克隆定理可知<sup>[25]</sup>, 量子态的精确复制是不可能的. 所以, 在量子网络中, 我们只能利用量子态的不精确克隆

来进行量子信息的复制.

要进行量子信息的多用户传送, 可以有二种方法:

其一是采用二步法, 即 Alice 先进行“1对2”的复制, 然后将其中的 1 个拷贝留存, 另一个拷贝通过隐形传态发送给  $Bob_1$ ;  $Bob_1$  进行和 Alice 同样的操作, 直到传送给  $Bob_m$ .

此种方法有一个突出的缺点: 因为量子态不能被精确复制, 其最佳保真度为  $5/6$ , 多次复制后, 其保真度为  $(5/6)^i, i = 1, 2, \dots, m$ , 当  $i$  增大时, 其保真度会急剧减小.

其二是利用隐形传态和“1对多”克隆一次性将量子信息发送给多个用户<sup>[23]</sup>.

具体操作步骤为: 首先建立多用户间的量子信道 (建立多粒子纠缠态), 然后进行“1对多”的量子远程克隆<sup>[23]</sup>. 利用“一对多”的量子远程克隆, 发送者可以同时将量子信息发送给不同地方的多个接受者. 其保真度  $\gamma$  为<sup>[23]</sup>

$$\gamma = \frac{M(N+1) + N}{M(N+2)}, \quad (1)$$

其中  $N$  为发送方数、 $M$  为接收方数且  $M > N$ , 当 1-2 复制时, 保真度可达  $5/6$ . 当“一对多”复制时, 保真度为

$$\gamma = \frac{2M+1}{3M} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3M}. \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 当一个发送者同时向多个用户发送信息时, 其保真度随接收方用户数的增加而减小, 其极限为  $2/3 (= 66.7\%)$ , 且每个用户接收到的信息质量相同, 不会出现二步法中逐用户信息质量变差的情况.

## 4 广播与组播

现在互联网上的每一个主机、交换机和路由器等设备都有一个 32 位 (IPv4) 的 IP 地址, 这个 IP 地址唯一标识了每个主机、路由器等设备. IP 地址包括网络号和主机号, 其中网络号标识该网络、主机号标识该网络中的主机. 为了避免地址冲突, 互联网中的所有 IP 地址都由一个国际权威机构 SRI 的网络信息中心 (NIC) 分配. 32 位的 IP 地址被划分为 A, B, C, D 和 E 五类地址, 其中 A, B 和 C 类地址用于标识主机等网络设备, D 类地址用于多点广播/组播, E 类地址保留未用. 此外, 还有一些具有特

殊意义的 IP 地址, 例如本网络广播和指定网络广播的 IP 地址. 根据 NIC 给 IP 地址赋予的意义, 我们可以进行量子隐形传态网络的广播与组播时的标识.

### 4.1 本地广播

若 Alice 和各接收者  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  属于同一网络 (见图 1), 当她有信息需要在本地广播时, 先向交换机发送一连接请求信号, 该连接请求信号中必须含有目的地址和源地址, 其目的地址中的网络号各位全为 0、主机号各位全为 1 (见图 2).

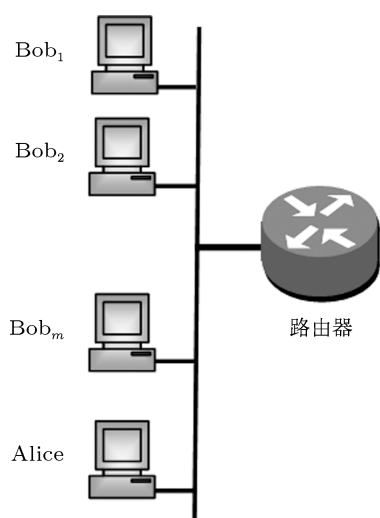


图 1 本地广播连接图

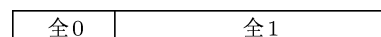


图 2 本地广播目的地址

当交换机收到 Alice 的连接请求后, 若检测到目的地址中的网络号为全 0、主机号为全 1 时 (见图 2), 便给本网络中的所有计算机 ( $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$ ) 都发送一连接指示信号,  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  收到连接指示信号后, 若准备受话, 便向交换机回复一连接响应信号, 交换机根据收到的连接响应信号判断已准备接收信号的计算机, 并逐一将各计算机建立纠缠<sup>[24,25]</sup>, 然后向 Alice 回复一连接证实信号; Alice 收到连接证实信号后通过 1— $m$  的方式进行克隆, 便可将手中的信息发送给  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  以进行本地的广播.

### 4.2 指定网络广播

若 Alice 和各接收者  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  属于不同网络, 但  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  属于同一网络 (见图 3), 当她有信息需要向指定网络广播时 (假设是第  $n$  子网), 先向交换机 1 发送一连接请求信号, 该连接请求信号中必须含有目的地址和源地址, 其目的地址中的网络号为指定网络、主机号各位均为 1 (见图 4).

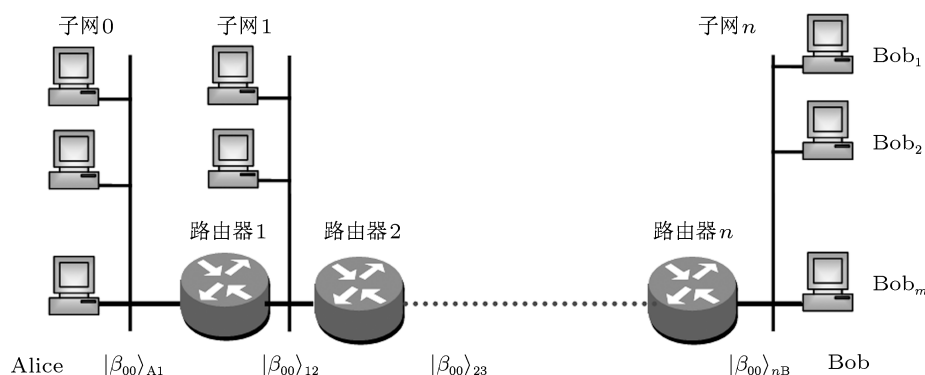


图 3 指定网络广播连接图

当交换机 1 收到 Alice 的请求后, 若检测到目的地址为如图 4 所示时, 则进行下列操作:

**第一步** 寻找路由, 并返回一张路由表, 该路由表中包含到达指定网络的路由器序列;

**第二步** 路由器 1 通过纠缠交换建立 Alice 和路由器 2 的纠缠, 并逐级通过纠缠交换建立 Alice 与路由器  $n$  的纠缠;

**第三步** 路由器  $n$  向  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$

发出连接指示信号,  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  收到连接指示信号后若准备受话, 则向路由器  $n$  发连接响应信号, 路由器  $n$  根据收到的连接响应信号确定受话对象并建立各受话对象与 Alice 的多用户信道, 再向 Alice 发送连接证实信号;

**第四步** Alice 收到连接证实信号后, 便进行  $1-m$  克隆将信息发送给各受话对象从而进行指定网络的广播.

网络号	全 1
-----	-----

图 4 指定网络广播目的地址

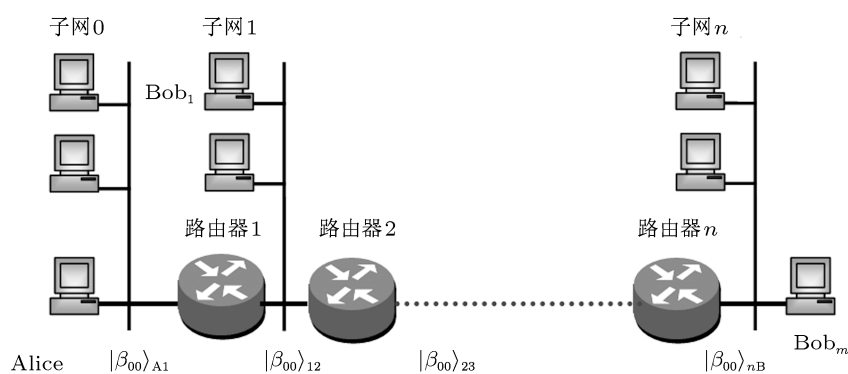


图 5 组播/多点广播连接图

1	1	1	0	
---	---	---	---	--

图 6 组播/多点广播目的地址

当交换机 1 收到 Alice 的请求后, 若检测到目的地址为如图 6 所示时, 则进行下列操作:

**第一步** 寻找路由, 并返回一张路由表, 该路由表中包含到达各受话对象的地址序列 (含路由器).

**第二步** 路由器 1 向  $Bob_1$  发送连接指示信号,  $Bob_1$  收到连接指示信号后若同意受话则向路由器 1 回复一连接响应信号, 路由器 1 收到  $Bob_1$  的连接响应信号后向 Alice 发送一连接指示信号并通过纠缠交换建立 Alice,  $Bob_1$  和路由器 2 的纠缠; 重复此过程直到建立 Alice 与  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  的纠缠并分别向 Alice 发送连接证实信号.

**第三步** Alice 收到各受话对象的连接证实信号后, 便进行  $1-m$  克隆将信息发送给各受话对象从而进行各受话对象的“组播/多点广播”.

### 4.3 组播/多点广播

若 Alice 和各接收者  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  属于不同网络, 设  $Bob_1$  位于子网 1,  $Bob_2$  位于子网 2,  $\dots, Bob_m$  位于子网  $m$  (见图 5), 当她有信息需要向  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  广播时, 先向交换机 1 发送一连接请求信号, 该连接请求信号中必须含有目的地址和源地址, 其目的地址中的网络号前 4 位为 1110, 其余各位为各受话方  $Bob_1, Bob_2, \dots, Bob_m$  的 IP 地址 (见图 6).

## 5 结论

研究表明, 利用纠缠交换可以实现量子隐形传态网络的互联, 通过建立多粒子纠缠可以建立多用户量子信道, 在此基础上进行“一对多”的量子克隆, 可以实现量子信息的组播与广播. 量子信息组播与广播时的保真度与受话的终端数有关, 且随受话终端数的增加而减少, 其极限为  $2/3$ .

现有的 internet 只需在互联设备上增加量子纠缠粒子对发送功能, 网络空闲时各主机和网络互联设备间利用量子纠缠对建立量子信道, 当信息发送者 Alice 有信息需要发送时, 就向与自己相连的交换机发送一连接请求信号, 交换机收到连接请求信号后通过检测目的地址判断是点到点的通信还是组播与广播, 若目的地址是 A 类、B 类或 C 类地址, 则进行点到点的通信操作 [24]; 若目的地址是 D 类地址或是有特殊意义的地址 (本地网络/指定网络广播), 则启动量子信息的广播与组播操作.

- [1] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Zhou J D, Hou G, Zhang Y D 2001 *Phys. Rev. A* **64** 012301
- [4] Yang C P, Guo G C 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 162
- [5] Braunstein S L, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 869
- [6] Zhou J D, Hou G, Wu S, Zhang Y D 2000 *arXiv: quant-ph/0006030*
- [7] Zheng S B 2004 *Phys. Rev. A* **69** 064302
- [8] He R, Bing H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060302 (in Chinese) [何锐, Bing H 2011 物理学报 **60** 060302]
- [9] Yin J, Qing Y, Li X Q, Bao X H, Peng C Z, Yang T, Pan G S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060308 (in Chinese) [印娟, 钱勇, 李晓强, 包小辉, 彭承志, 杨涛, 潘阁生 2011 物理学报 **60** 060308]
- [10] Zhou N R, Zheng B Y, Wang L J, Gong L U 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2193 (in Chinese) [周南润, 曾宾阳, 王立军, 龚黎华 2010 物理学报 **59** 2193]
- [11] Yang X L, Zhou X Q, Zhao H, Wang P P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 020303 (in Chinese) [杨小琳, 周小清, 赵晗, 王朋朋 2012 物理学报 **61** 020303]
- [12] Zheng S B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 064204
- [13] Li J, Wu S H, Zhang W W, Xi X Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 100308
- [14] Bouwmeester D, Pan J W, Daniell M, Weinfurter H, Zeilinger A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1345
- [15] Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S, Bertet P, Brune M, Rajmond J M, Haroche S 2000 *Science* **288** 2024
- [16] Sackett C A, Kielpinski D, King B E, Langer C, Meyer V 2000 *Nature* **404** 256
- [17] Pan J W, Daniell M, Gasparoni S, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4435
- [18] Zhao Z 2004 *Nature* **430** 54
- [19] Karlsson A, Bourennane M 1998 *Phys. Rev.* **58** 4394
- [20] Zhou X Q, Wu Y W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1881 (in Chinese) [周小清, 邬云文 2007 物理学报 **56** 1881]
- [21] Zhao H, Zhou X Q, Yang X L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5970 (in Chinese) [赵晗, 周小清, 杨小琳 2009 物理学报 **58** 5970]
- [22] Zhao H, Zhou X Q, Yang X L 2010 *Optics Communications* **283** 2472
- [23] Mourao M, Jonathan D, Plenio M B, Verdril V 1999 *Phys. Rev. A* **59** 156
- [24] Zhou X Q, Wu Y W, Zhao H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040304 (in Chinese) [周小清, 邬云文, 赵晗 2011 物理学报 **60** 040304]
- [25] wootter W K, Zurek W H 1982 *Nature* **292** 802

# Broadcast and multicast in quantum teleportation internet\*

Zhou Xiao-Qing Wu Yun-Wen<sup>†</sup>

(Department of Physics, Jishou University, Jishou 416000, China)

(Received 30 December 2011; revised manuscript received 16 February 2012)

## Abstract

The physical principle of broadcast and multicast is given. When Alice needs to send out an information, she sends out a conjunction claim signal to the switch that connects with hers. After receiving the conjunction claim the signal, the switch pass to examines the purpose address to judge whether it is a point-to-point communication or broadcast and multicast. If the purpose address is A or B or C address, then the switch carries on the correspondence operation of point-to-point; if the purpose address is a D address or an address (local or appointed network webcasting) with special meaning, then the switch carries on the correspondence operation of broadcast and multicast. With broadcast and multicast, the fidelity decreases with the increase of receiving terminal number, and its limit is  $2/3$ .

**Keywords:** teleportation, internet, broadcast, multicast

**PACS:** 03.67.Hk, 42.50.Ex, 89.70.-a

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (Grant No. 11JJ3003), and the Science and Technology Plan Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2010FJ3081).

<sup>†</sup> E-mail: wuyw.jd@163.com