

基于分组交换的量子通信网络传输协议及性能分析

聂敏 王林飞 杨光 张美玲 裴昌幸

Transmission protocol and its performance analysis of quantum communication network based on packet switching

Nie Min Wang Lin-Fei Yang Guang Zhang Mei-Ling Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 210303 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.210303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子直接通信

[Quantum secure direct communication](#)

物理学报.2015, 64(16): 160307 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160307>

噪声情况下的量子网络直接通信

[Quantum network direct communication protocol over noisy channel](#)

物理学报.2015, 64(16): 160306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160306>

利用信息流方法优化多激发自旋链中的量子态传输

[Optimizing quantum state transfer in multi-excitation spin chains via information flux](#)

物理学报.2015, 64(16): 160305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160305>

PM2.5 大气污染对自由空间量子通信性能的影响

[Influences of PM2.5 atmospheric pollution on the performance of free space quantum communication](#)

物理学报.2015, 64(15): 150301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.150301>

基于纠缠态的量子通信网络的量子信道建立速率模型

[Quantum channel establishing rate model of quantum communication network based on entangled states](#)

物理学报.2015, 64(4): 040301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040301>

基于分组交换的量子通信网络传输协议及性能分析*

聂敏¹⁾ 王林飞^{1)†} 杨光¹⁾²⁾ 张美玲¹⁾ 裴昌幸³⁾

1)(西安邮电大学通信与信息工程学院, 西安 710121)

2)(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

3)(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

(2015年4月28日收到; 2015年6月23日收到修改稿)

量子纠缠交换能够建立可靠的量子远程传输信道, 实现量子态的远程传输. 然而, 基于纠缠交换的量子信道要求网络高度稳定, 否则会浪费大量纠缠资源. 为节省纠缠资源, 本文根据隐形传态理论, 提出了一种基于分组交换的量子通信网络传输协议, 建立了发送量子态所需的纠缠数目与所经过的路由器数、链路错误率的定量关系, 并与纠缠交换传输协议进行了比较. 仿真结果表明, 在链路错误率为0.1%时, 分组传输协议所使用的纠缠数目少于纠缠交换的数目, 另外, 随着错误率的升高, 分组传输协议所需的纠缠数比纠缠交换协议明显减少. 由此可见, 基于分组交换的量子通信网络传输协议在网络不稳定时, 能够节省大量纠缠资源, 适用于链路不稳定的量子通信网络.

关键词: 量子通信, 分组交换, 量子隐形传态

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Dv

DOI: 10.7498/aps.64.210303

1 引言

量子通信是基于量子力学原理的新型信息传输技术. 相对于经典通信技术, 量子通信具有更高的安全性. 1984年, Bennett和Brassard提出了著名的BB84协议^[1], 利用非正交量子态不可区分原理实现信息的远程安全传输. 随后陆续出现了E91协议^[2], B92协议^[3], 4+2协议^[4], 这些协议进一步提升了量子通信的保密和抗干扰性能. 1993年Bennett等提出了著名的量子隐形传态方案^[5], 实现了量子态更加安全的远程传输, 量子通信的发展由此进入了新的阶段. 1997年, Zeilinger团队首次成功通过实验, 验证了量子态隐形传送^[6], 证明了量子隐形传态方案的可行性. 2010年, 中国科学技术大学与清华大学成功实现了16 km自由空间

量子隐形传态^[7]. 2012年, 维也纳大学和奥地利科学院创造了量子隐形传态新的记录^[8], 将传输距离扩展至143 km. 2013年, Ding等通过激光冷却和囚禁技术, 成功实现了携带轨道角动量、具有空间结构的单光子脉冲的存储与释放^[9], 验证了高维量子态存储的可行性, 该技术解决了量子态传输过程中的存储难题.

纠缠交换策略能够建立端到端的量子信道, 量子局域网^[10]、量子交换机^[11]、量子中继器^[12]以及基于路由的量子信息传输^[13]的实现, 都使用了纠缠交换策略建立量子信道. 然而, 量子纠缠交换虽然可以建立可靠的量子信道, 保证量子通信的绝对安全, 但信道建立过程要求链路稳定, 否则, 将导致量子信道建立失败, 浪费大量纠缠资源. 经典计算机网络中的分组交换传输方式, 不仅提高了信道利用率, 而且还能够降低对信道稳定性的依赖程

* 国家自然科学基金(批准号: 61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: 2014JQ8318)和陕西省国际科技合作与交流计划项目(项目编号: 2015KW-013)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 304375220@qq.com

度. 考虑到量子纠缠分发过程中噪声和干扰的影响, 将分组交换应用于量子通信中, 无疑会降低量子信息传输对信道稳定性的要求, 并节约量子纠缠资源. 2000年, Chan等首次提出以量子分组形式将语音信息通过量子IP进行逐跳传输^[14], 该方案证明量子分组传输能够缩短打包时延, 并兼容传统IP分组的传输, 有利于网络互连. 2008年, Ray等对量子分组网策略进行了研究^[15], 提出了量子IP分组格式, 使量子分组的多路传输成为可能. 2014年, 王建民研究了基于分组传输的量子通信网络架构^[16], 对量子分组网络的传输速率、扩展性、安全性作了分析, 验证了量子分组网络应用于量子通信的可行性.

以上研究成果, 虽然将分组交换应用于量子信息传输, 但未给出具体的量子分组传输实现方法. 为此, 本文提出了一种基于分组交换的量子通信网络传输协议, 建立了量子分组传输的实现过程. 该协议不仅可实现量子分组的安全可靠传输, 而且有效地节约了纠缠资源.

2 分组传输网络

在传统通信网中, 数据传输通常使用两种方式: 线路交换和分组交换^[17]. 线路交换是指在数

据传输之前, 建立一条由源地址到目的地址的端到端物理链路, 这条链路作为此次通信的专用链路, 网络中的节点不对所传输的数据进行存储和改变, 它的优点是通信的实时性强, 传输时延小, 尤其适用于语音、视频等实时通信, 但是其链路利用率低, 对系统稳定性要求高, 量子通信中的纠缠交换类似于这种方式. 分组交换中有一种形式称为数据报传输, 它是将所要传输的信息数据进行分组编号, 发送到路由器, 路由器先将数据进行存储, 再根据路由表和链路状态对每个分组进行单独的路由选择, 最终所有的分组到达目的地址后, 进行排序并重新组装成信息数据. 与线路交换方式相比, 数据报方式传输时延大, 但链路利用率高, 对网络的稳定性要求低, 因此更适合大规模网络, 量子分组传输类似于这种形式.

3 量子分组网传输协议

3.1 纠缠交换传输协议

根据文献^[10]所使用的纠缠交换策略, 简单的纠缠交换传输协议如图1所示. Alice和Bob进行通信, 按以下步骤进行:

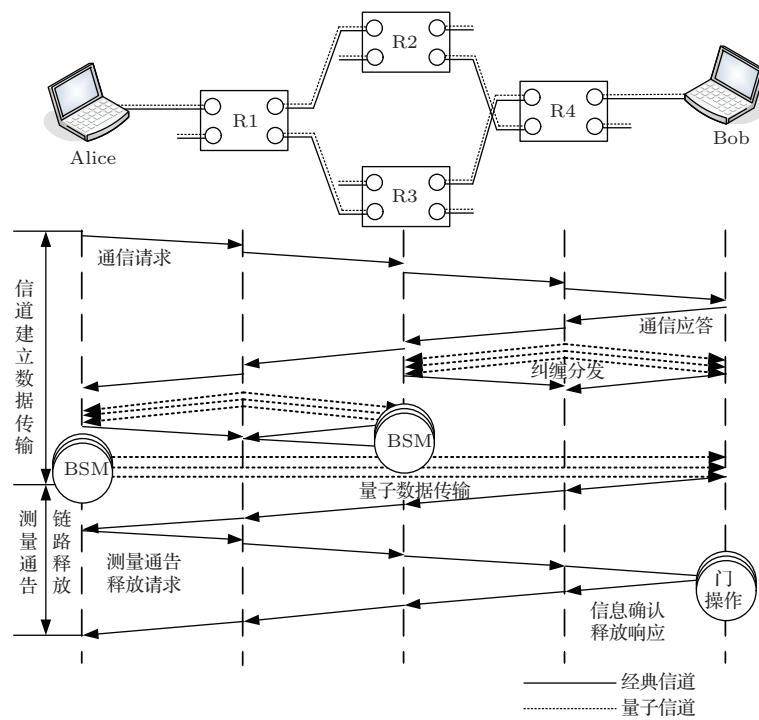


图1 纠缠交换传输协议

Fig. 1. The transmission protocol based on entanglement swapping.

1) Alice通过路由器R1, R2(或R3), R4经典信道发送IP数据包, 告知Bob, 请求与Bob建立量子纠缠信道, 发送长度为 K 的量子态.

2) Bob通过反向经典信道发送IP数据包, 将路由信息返回给Alice, 确认与Alice通信, 若Alice未收到应答, 则认为请求出错, 重新发请求数据包.

3) 根据文献[13], 为减少时延, Alice与Bob同时从两端开始向对方建立量子信道, 方法如下: R1产生一对纠缠粒子束 A_i 和 $B_i(i = 0, 1, 2, \dots, K)$, 分发给Alice和R2, 以1和2代表第一对纠缠粒子, 状态为 $|\varphi\rangle_{12} = 1/\sqrt{2}(|01\rangle_{12} + |10\rangle_{12})$, R4产生一对纠缠粒子束 C_i 和 $D_i(i = 0, 1, 2, \dots, K)$, 分发给Bob和R2, 若R2, Alice, Bob未接收到纠缠粒子束, 则认为链路不通, 返回1).

4) 以 $1'$ 和 $2'$ 代表第二对纠缠粒子, 状态为 $|\varphi\rangle_{1'2'} = 1/\sqrt{2}(|10\rangle_{1'2'} - |01\rangle_{1'2'})$,

粒子1, 2, $1'$ 和 $2'$ 组成系统:

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle_{12} \otimes |\varphi\rangle_{1'2'} \\ &= 1/2(|01\rangle_{12} + |10\rangle_{12})(|10\rangle_{1'2'} - |01\rangle_{1'2'}) \\ &= 1/2(|0110\rangle_{121'2'} - |0101\rangle_{121'2'} + |1010\rangle_{121'2'} \\ & \quad - |1001\rangle_{121'2'}), \end{aligned} \quad (1)$$

R2对收到的粒子2和 $2'$ 进行Bell态测量, Bell基的表达式为

$$\begin{aligned} |\varphi^\pm\rangle &= 1/\sqrt{2}(|00\rangle \pm |11\rangle), \\ |\psi^\pm\rangle &= 1/\sqrt{2}(|01\rangle \pm |10\rangle). \end{aligned} \quad (2)$$

(1)式改写为

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle_{12} \otimes |\varphi\rangle_{1'2'} \\ &= \frac{1}{2}[(|01\rangle_{11'} - |10\rangle_{11'})(|01\rangle_{22'} + |10\rangle_{22'}) \\ & \quad - (|01\rangle_{11'} + |10\rangle_{11'})(|01\rangle_{22'} - |10\rangle_{22'}) \\ & \quad + (|00\rangle_{11'} + |11\rangle_{11'})(|00\rangle_{22'} - |11\rangle_{22'}) \\ & \quad - (|00\rangle_{11'} - |11\rangle_{11'})(|00\rangle_{22'} + |11\rangle_{22'})] \\ &= [|\psi\rangle_{11'}^- |\psi\rangle_{22'}^+ - |\psi\rangle_{11'}^+ |\psi\rangle_{22'}^- + |\varphi\rangle_{11'}^+ |\varphi\rangle_{22'}^- \\ & \quad - |\varphi\rangle_{11'}^- |\varphi\rangle_{22'}^+]. \end{aligned} \quad (3)$$

假设选用的是 $|\psi\rangle_{22'}^-$, 则测量后粒子1, $1'$ 状态为 $|\psi\rangle_{11'}^+$, 实现纠缠, Alice和Bob之间建立第一纠缠量子信道.

5) Alice将第一个量子信息 $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 加载到已经建立的量子信道上, Alice将 $|\varphi\rangle$ 与粒子1做Bell态测量, 相当于将 $|\varphi\rangle$ 与纠缠粒子1和 $1'$ 进行直积:

$$|\varphi\rangle |\psi\rangle_{11'}^+$$

$$\begin{aligned} &= (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{11'} + |10\rangle_{11'}) \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |010\rangle) + \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|101\rangle + |110\rangle). \end{aligned} \quad (4)$$

6) Alice将粒子 $|\varphi\rangle$ 和粒子1送入受控非门, 上式变为

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle |\varphi\rangle^+ \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |010\rangle) + \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|111\rangle + |100\rangle) \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}|0\rangle(|01\rangle + |10\rangle) \\ & \quad + \frac{\beta}{\sqrt{2}}|1\rangle(|11\rangle + |00\rangle). \end{aligned} \quad (5)$$

再将第一个粒子通过Hadamard门, 上式变为

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle |\varphi\rangle^+ \\ &= \frac{\alpha}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|01\rangle + |10\rangle) \\ & \quad + \frac{\beta}{2}(|0\rangle - |1\rangle)(|11\rangle + |00\rangle) \\ &= \frac{1}{2}|00\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + \frac{1}{2}|01\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \\ & \quad + \frac{1}{2}|10\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \\ & \quad + \frac{1}{2}|11\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle). \end{aligned} \quad (6)$$

7) Alice对自己的两个粒子进行测量, 则可能出现四种结果, 分别是 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ 和 $|11\rangle$, 概率各为 $\frac{1}{4}$, 所有 K 个量子态都按照步骤4)—7)传输.

8) Alice将自己的所有测量结果依次按照表1进行编码, 并通过经典信道告诉Bob, Bob根据Alice发来的编码将自己所拥有的每个粒子按照表1做适当的门操作, 就能恢复所有的量子态.

表1 Bob恢复初始量子态的参照表

Table 1. The reference table of Bob restore the initial quantum states.

Alice的测量结果	Alice发给Bob的信息	Bob相应操作
$ 00\rangle$	00	通过X门
$ 01\rangle$	01	什么都不做
$ 10\rangle$	10	先通过X门, 再通过Z门
$ 11\rangle$	11	通过Z门

3.2 分组交换传输协议

图2为分组交换传输协议, Alice和Bob进行通信, 按以下步骤进行:

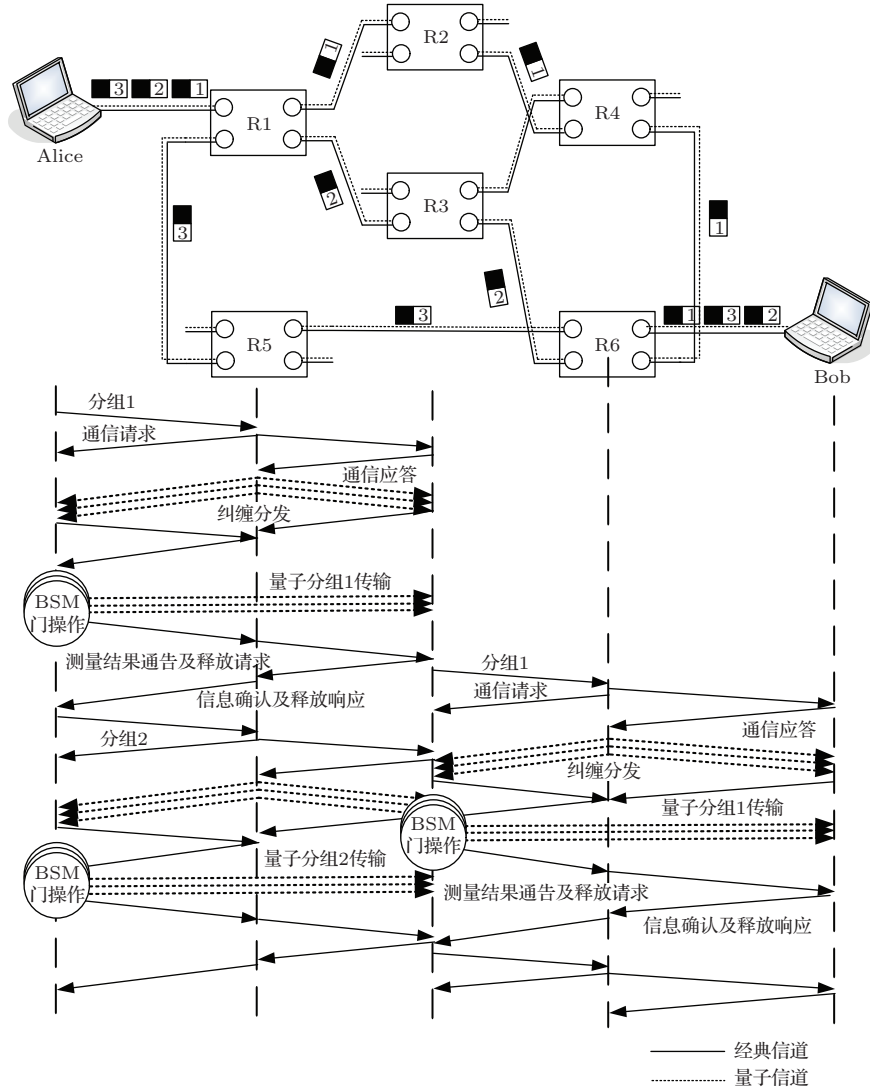


图2 分组交换传输协议

Fig. 2. The transmission protocol based on packet switching.

1) Alice将所要发送的量子数据进行分组编号, 通过经典信道发送经典IP数据包, 通过经典信道建立与路由器R1的连接, 请求发送量子分组1, 量子分组长度为 k .

2) R1查看Alice所发送数据包的目的IP地址, 并查找自己的路由表, 根据链路的路径值与链路空闲状态, 确定下一跳的路由器为R2, R1产生纠缠粒子束 A_i 和 B_i ($i = 0, 1, 2, \dots, k$), 分发给Alice和R2, 以1和2代表第一对纠缠粒子, 状态为 $|\varphi\rangle_{12} = 1/\sqrt{2}(|01\rangle_{12} + |10\rangle_{12})$, 若Alice, R2未能接收到纠缠粒子束, 则标记链路错误, 重新查找路由表.

3) R1通过经典信道确定Alice和R2分别接收到粒子1和2后, 给Alice发送确认信息, 根据隐形传态原理^[5], Alice与R2成功建立第一个量子信道.

4) Alice将量子信息 $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 加载到已经建立的量子信道上, Alice将 $|\varphi\rangle$ 与粒子1做Bell态测量, 相当于将 $|\varphi\rangle$ 与纠缠粒子对1和2进行直积, 结果如下:

$$\begin{aligned}
 |\varphi\rangle|\varphi^+\rangle_{12} &= (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{12} + |10\rangle_{12}) \\
 &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |010\rangle) \\
 &\quad + \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|101\rangle + |110\rangle). \tag{7}
 \end{aligned}$$

5) Alice将粒子 $|\varphi\rangle$ 和粒子1送入受控非门, 上式变为

$$\begin{aligned}
 |\varphi\rangle|\varphi^+\rangle &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |010\rangle) \\
 &\quad + \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|111\rangle + |100\rangle)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}} |0\rangle (|01\rangle + |10\rangle) \\
 &\quad + \frac{\beta}{\sqrt{2}} |1\rangle (|11\rangle + |00\rangle). \quad (8)
 \end{aligned}$$

再将第一个粒子通过 Hadamard 门, 上式变为

$$\begin{aligned}
 |\varphi\rangle |\varphi^+\rangle &= \frac{\alpha}{2} (|0\rangle + |1\rangle)(|01\rangle + |10\rangle) \\
 &\quad + \frac{\beta}{2} (|0\rangle - |1\rangle)(|11\rangle + |00\rangle) \\
 &= \frac{1}{2} |00\rangle (\alpha |1\rangle + \beta |0\rangle) \\
 &\quad + \frac{1}{2} |01\rangle (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) \\
 &\quad + \frac{1}{2} |10\rangle (\alpha |1\rangle - \beta |0\rangle) \\
 &\quad + \frac{1}{2} |11\rangle (\alpha |0\rangle - \beta |1\rangle). \quad (9)
 \end{aligned}$$

6) Alice 对自己的两个粒子进行测量, 则可能出现四种结果, 分别是 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ 和 $|11\rangle$, 概率各为 $\frac{1}{4}$, 所有 k 个量子态都按照步骤 4)—6) 传输.

7) Alice 将自己所有的测量结果依次按照表 1 进行编码, 并通过经典信道告诉 R2, R2 根据 Alice 发来的编码将自己所拥有的每个粒子按照表 1 做适当的门操作, 在 R2 端重建量子分组 1.

8) R2 通过经典信道对量子分组 1 给予确认, 否则, Alice 认为量子分组未传输成功.

9) Alice 将第一个分组发送完毕后, 就能以同样的方式发送后续分组, R2 接收 Alice 发送的第一个量子分组数据后, 根据目的地址查找自己的路由表, 寻找下一跳路由为 R4, R2 向 R4 的发送量子分组传输请求.

10) R4 查看 R2 所发送数据包的目的 IP 地址, 并查找自己的路由表, 根据链路的路径值与链路空闲状态确定下一跳的路由器为 R6, R4 为 R2 与 R6 分发纠缠粒子束 C_i 和 $D_i (i = 0, 1, 2, \dots, k)$, 建立量子信道, 实现量子分组 1 从 R2 到 R6 的传输, 如果 R2 与 R6 之间的量子分组传输出错, 则量子分组被破坏, R2 需通过 R1 通知 Alice 编号为 1 的量子分组未传输成功, 返回 1).

11) R6 接收 R2 发送的量子数据包后, 根据目的地址查找自己的路由表, 找到目的地址为 Bob, R6 产生纠缠粒子束 E_i 和 $F_i (i = 0, 1, 2, \dots, k)$, 自己保留 E_i , 将 F_i 发送给 Bob, 与 Bob 建立量子信道, 并将分组信息发送给 Bob.

12) Bob 接收到所有的量子分组信息以后, 对信息进行重新排序, 提交给上层处理.

4 量子分组网性能分析及仿真

4.1 可靠性

在量子分组的传输过程中使用了量子隐形传态原理, 量子信息不会改变; 每个分组独立的选择传输路径, 到达目的节点后进行重新组装, 不破坏信息的完整性; 当有量子分组在传输过程中发生错误时, 协议使用返回重传的方式, 请求 Alice 将该量子分组进行重新传送, 重新传送时根据路由表和链路状态重新选择的传输路径, 适用于动态的量子网络.

4.2 安全性

在保证目的地址不被改变的条件下, 在复杂的网络中, 由于网络中流量控制和拥塞控制的影响, 量子分组在每一步传输的过程中选取的路由不尽相同, 保证了分组信息传输的安全; 另外, 量子分组传输所采用的量子隐形传态原理能够保证量子态不被窃听.

4.3 纠缠利用率

纠缠是一种资源, 高效的使用纠缠是量子通信网络发展的必然要求. 根据量子分组传输协议, 假设经过 n 个路由器, 分组的个数为 m , 每个分组的量子态数量为 k , 总量子态 $K = mk$, 所需要的纠缠数与经过的路由器奇偶数相关, 所若 n 为奇数, 则所需要的纠缠数为

$$Num = \frac{(n+1)mk}{2}. \quad (10)$$

若 n 为偶数, 则所需要的纠缠数为

$$Num = \frac{(n+2)mk}{2}. \quad (11)$$

纠缠交换传输中, 若 n 为奇数:

$$Num' = \frac{(n+1)K}{2}. \quad (12)$$

若 n 为偶数:

$$Num' = \frac{(n+2)K}{2}. \quad (13)$$

可见, 量子分组交换与纠缠交换发送等量的量子态所使用的纠缠数相同.

假设量子态传输过程中每条链路出现故障的概率为 r , 对于量子分组传输网, 从源地址到第 2 个路由器之间发生错误的概率为 $2r$, 需重新分发的

量子纠缠对数量为 $2rkm$, 从第 2 个路由器到第 4 个路由器之间发生错误的概率为 $2r$, 需从源地址重新分发的量子纠缠对数量为总计 $4rkm$, 以此类推, 若 n 为奇数, 量子分组交换整个链路所需要的纠缠对数为

$$Num = \frac{(n+1)mk}{2} + \sum_1^{\frac{n+1}{2}} 2mrk = \frac{(n+1)mk}{2} + \frac{(n^2+4n+3)mk}{4}. \quad (14)$$

若 n 为偶数, 从源地址到最后一个路由器需重新分发的量子纠缠对数量为 $\frac{(n^2+2n)mrk}{8}$, 若最后一个路由器到目的地发生错误, 则需重新发送的量子纠缠对数量为 $(\frac{n}{2}+1)mrk$, 因此整个链路所需要的纠缠对数为

$$Num = \frac{(n+2)mk}{2} + \sum_1^{\frac{n}{2}} 2mrk + (1+\frac{n}{2})mrk = \frac{(n+2)mk}{2} + \frac{(n^2+6n+8)mk}{4}. \quad (15)$$

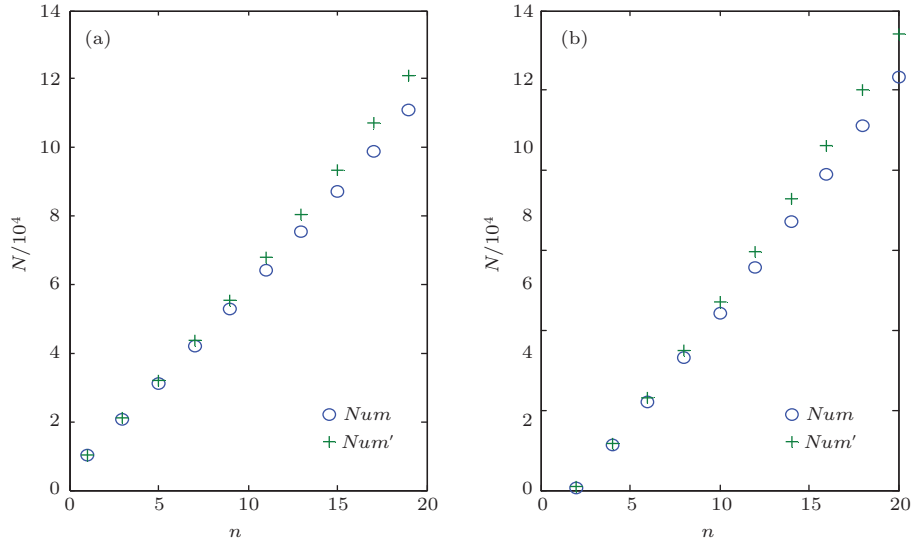


图3 纠缠数与路由器个数的对应关系 (a) n 为奇数; (b) n 为偶数

Fig. 3. The correspondence of entanglement number and the routers: (a) n is an odd number; (b) n is an even number.

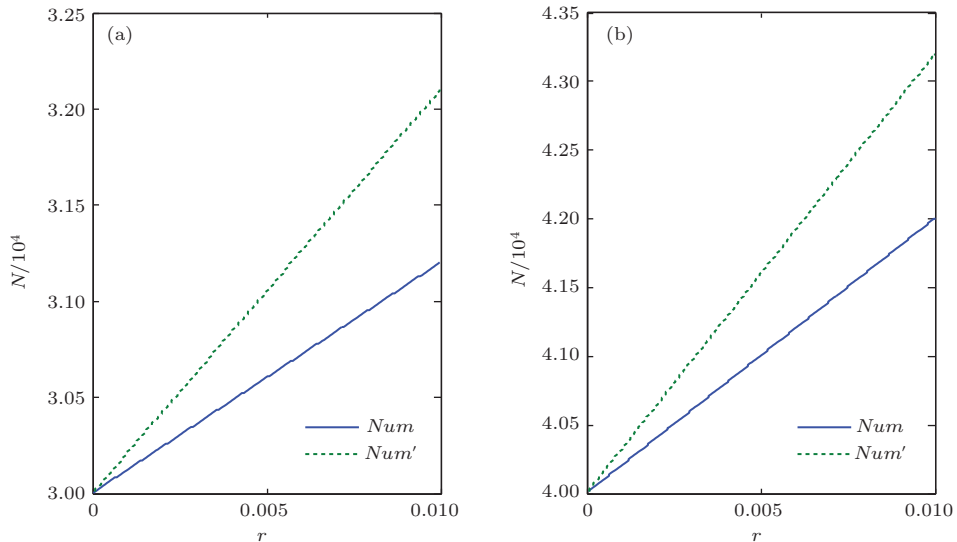


图4 纠缠数与链路错误率的对应关系 (a) n 等于 5; (b) n 等于 6

Fig. 4. The correspondence of entanglement number and the link error rates: (a) n is equal to $5r$ and N ; (b) n is equal to $6r$ and N .

对于纠缠交换传输, 无论哪段链路出现故障, 都需从两端重新建立链路, 链路段数为 $n + 2$, 则传输总长度为 K 的量子态, 若 n 为奇数, 所需要的纠缠对数为

$$Num' = \frac{K}{2}(n + 1) + \frac{Kr}{2}(n + 1)(n + 2). \quad (16)$$

若 n 为偶数:

$$Num' = \frac{K}{2}(n + 2) + \frac{Kr}{2}(n + 2)(n + 2). \quad (17)$$

图 3 为当链路错误率为 $r = 0.001$ 时, 发送分组数 $m = 10$, 每个分组量子态 $k = 1000$, 所需的纠缠数 N 随着路由器个数的增加而增长, 纠缠交换传输发送 $K = mk = 10000$ 个量子态所需的纠缠数 Num' 多于分组传输所需的纠缠数 Num .

当所经过路由器个数一定时, 发送 $K = mk = 10000$ 个量子态, 分组数 $m = 10$, 每个分组量子态 $k = 1000$, 所需的纠缠数 N 与链路错误率对应关系如图 4, 从图中可以看出, 链路错误率 r 取 $[10^{-5}, 10^{-2}]$, 随着链路错误率 r 增长, 分组交换传输所需的纠缠数 Num 少于纠缠交换传输所需的纠缠数 Num' .

5 结 论

针对量子通信网中链路不稳定所带来的量子纠缠资源浪费问题, 本文提出了一种基于分组交换的量子通信网络传输协议, 并对其可靠性、安全性及纠缠利用率进行了分析和仿真. 结果表明, 若不考虑信道链路发生错误, 使用分组交换传输协议与纠缠交换传输协议发送等量的量子态, 则两者所需的纠缠数目相同; 若信道链路发生错误, 则分组交换传输协议明显比纠缠交换传输协议节约省量子纠缠资源, 所节约的量子纠缠数随着路由器个数的增加和链路错误率的升高而增加. 因此, 本文所提出的基于分组交换的量子通信网络传输协议, 在保证量子信息可靠、安全传输的条件下, 能够节约纠缠资源, 可广泛应用于未来大规模量子通信网络的建设.

参考文献

- [1] Bennett C H, Brassard G 1984 *Processing of the IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing* Bangalore, India, December 10–12, 1984 p175
- [2] Ekert A 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 661
- [3] Bennett C H 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3121
- [4] Huttner B, Imoto N, Mor T 1995 *Phys. Rev. A* **51** 1863
- [5] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [6] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [7] Jin X M, Ren J G, Yang B, Yi Z H, Zhou F, Xu X F, Wang S K, Yang D, Hu Y F, Jiang S, Yang T, Yin H, Chen K, Peng C Z, Pan J W 2010 *Nat. Photonics* **4** p376
- [8] Ma X S, Herbst T, Scheidl T, Wang D Q, Kropatschek S, Naylor W, Wittmann B, Mech A, Kofler J, Anisimova E, Makarov V, Jennewein T, Ursin R, Zeilinger A 2012 *Nature* **489** 7415
- [9] Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, Guo G C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2527
- [10] Zhu C H, Pei C X, Ma H X, Yu X F 2006 *J. Xidian Univ.* **33** 839 (in Chinese) [朱畅华, 裴昌幸, 马怀新, 于晓飞 2006 西安电子科技大学学报 **33** 839]
- [11] Zhun W, Nie M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130304 (in Chinese) [朱伟, 聂敏 2013 物理学报 **62** 130304]
- [12] Xue L, Nie M, Liu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 170305 (in Chinese) [薛乐, 聂敏, 刘晓慧 2013 物理学报 **62** 170305]
- [13] Yu X T, Xu J, Zhang Z C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220303 (in Chinese) [余旭涛, 徐进, 张在琛 2012 物理学报 **61** 220303]
- [14] Chan H C B, Leung V C M 2000 *Conference on Electrical and Computer Engineering* Halifax, Canada, Mar 7–10, 2000 p459
- [15] Ray Y W L, Henry C B C, Hui C, Tharam S D, Victor O K L, Victor C M L 2008 *J. Commun. Netw-s. Kor.* **10** 316
- [16] Wang J M 2014 *MS Dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [王建民 2014 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [17] Wu G Y 2007 *The Internet Network*(Beijing: Tsinghua University press) p17–22 (in Chinese) [吴功宜 2007 计算机网络 (北京: 清华大学出版社) 第 17—22 页]

Transmission protocol and its performance analysis of quantum communication network based on packet switching*

Nie Min¹⁾ Wang Lin-Fei^{1)†} Yang Guang¹⁾²⁾ Zhang Mei-Ling¹⁾ Pei Chang-Xing³⁾

1) (*School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710121, China*)

2) (*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

3) (*State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an 710071, China*)

(Received 28 April 2015; revised manuscript received 23 June 2015)

Abstract

Quantum entanglement swapping can be used to establish reliable quantum remote transmission channel so as to realize transmission of quantum states. However, the highly stable quantum network is required in the quantum channels when using quantum entanglement swapping, otherwise it will waste a lot of entanglement resources. In order to save entanglement resources, we have to put forward a kind of quantum communication network transmission protocol based on packet switching, according to the theory of quantum teleportation. Firstly, the principle of packet switching in computer network is introduced. Next we describe the implementation process of quantum network transmission protocols which are based on entanglement swapping and packet switching. We then analyze the reliability, security and utilization rate of entanglement of the protocol we have proposed. And after that the quantitative relationship about the number of entanglement quantum states, the number of routers and link error rates are calculated. Finally, we compare these two transmission protocols. Simulation results show that the number of entanglement for these two protocols is equal without consideration of the link errors. When taking them into account, the packet switching transmission protocol can save numbers of entanglement resources obviously. In addition, with the increase of number of routers and the rise in link error rates, the quantum communication network transmission protocol based on packet switching will need less entanglement resources than that based on entanglement swapping. Therefore, when the quantum transmission network is not stable, the packet switching transmission protocol has a better transmission performance, and it can be applied to the future construction of quantum network.

Keywords: quantum communication, packet switching, quantum teleportation

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Dv

DOI: [10.7498/aps.64.210303](https://doi.org/10.7498/aps.64.210303)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172071, 61201194), the Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province, China(Grant No. 2014JQ8318), and the International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province, China(Grant No. 2015KW-013).

† Corresponding author. E-mail: 304375220@qq.com