

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.03.001

引用格式:许敏,聂敏,杨光,等.一种基于纠缠交换的远程量子链路建立策略[J].电讯技术,2016,56(3):233-240. [XU Min,NIE Min,YANG Guang,et al.
A strategy of establishing remote quantum link based on entanglement swapping[J].Telecommunication Engineering,2016,56(3):233-240.]

一种基于纠缠交换的远程量子链路建立策略*

许 敏**¹,聂 敏¹,杨 光^{1,2},裴昌幸³

- (1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710061;
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)

摘 要:提出一种以纠缠交换作为核心技术的远程量子链路建立策略,建立了基于链路状态矩阵的量子链路模型并分析了纠缠交换的实现和矩阵表示。提出了链路协议栈以及端到端的建立策略,分析了矩阵控制下的纠缠交换和纠缠纯化流程,计算得出了在基于自动重传请求(ARQ)协议经典信息辅助下的链路时延和吞吐量与节点数、误帧率、平均距离、操作成功率之间的定量关系。仿真结果表明:处于同一状态区间内的链路性能随节点数呈现出较为一致和平缓的变化;不同区间内的链路性能差异较为显著,在节点平均距离为1 km、经典信息误帧率为0、纠缠保真度为0.98的情况下,当节点数分别为32、33和34时,链路时延分别为1.077 0 ms、1.090 3 ms和1.669 0 ms,链路吞吐量分别为0.928 5 kb/s、0.917 2 kb/s和0.599 2 kb/s。

关键词:量子通信;量子链路;纠缠交换;纠缠纯化;链路时延;链路吞吐量
中图分类号:TN915.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)03-0233-08

A Strategy of Establishing Remote Quantum Link Based on Entanglement Swapping

XU Min¹, NIE Min¹, YANG Guang^{1,2}, PEI Changxing³

- (1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China;
2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A remote quantum link establishment strategy which uses entanglement swapping as the core technology is proposed. The model of quantum link based on state matrix is established and its entanglement swapping implementation and its matrix representation are analyzed. The process of entanglement swapping and entanglement purification under control of the matrix is also discussed. With classical auxiliary information based on automatic repeat request (ARQ) protocol, the quantitative relationship between link delay (throughput) and node number, frame error rate, average distance, operation success rate is calculated. Simulation results show that the performance of links in the same state interval varies consistently and gradually while links in different ranges behave very differently. Setting average distance to be 1 km, frame error rate to be 0, entanglement fidelity to be 0.98, when the node number is 32, 33, 34, the time delay is 1.077 0 ms, 1.090 3 ms and 1.669 0 ms, the throughput is 0.928 5 kb/s, 0.917 2 kb/s and 0.599 2 kb/s, respectively.
Key words: quantum communication; quantum link; entanglement swapping; entanglement purification; link time delay; link throughput

* 收稿日期:2015-11-16;修回日期:2016-01-19 Received date:2015-11-16;Revised date:2016-01-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172071,61201194);陕西省自然科学基金研究计划(2014JQ8318);陕西省国际科技合作与交流计划(2015KW-013)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China (No.61172071,61201194);The Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province (2014JQ8318);International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program of Shaanxi Province (2015KW-013)

** 通信作者:1145045705@qq.com Corresponding author:1145045705@qq.com

1 引言

量子纠缠是量子通信过程中的重要资源,也是量子通信与经典通信区别的一个重要特征。基于纠缠的非定域性^[1],通信双方一旦建立了纠缠连接,就可以借助纠缠关联执行量子密钥分发、量子秘密共享、量子安全直接通信^[2-3]等各种通信协议。基于纠缠的研究与应用是目前量子计算与量子信息领域的研究热点。2012 年 9 月,德国 Max Planck 研究所与奥地利量子光学与量子信息研究所(Institute for Quantum Optics and Quantum Information, IQOQI)成功进行了143 km自由空间量子隐形传态实验^[4],验证了量子隐形传态在真实环境下的成熟性和适应性。2013 年 9 月,日本 NTT 基础研究实验室与 NTT 光子实验室在光纤中成功进行了300 km的纠缠分发^[5],阐明了在光纤中进行远距离量子通信实验的可能性。2015 年 4 月,清华大学与中国科学技术大学联合研制了一种高亮度和高纠缠度的一体化纠缠源系统^[6],并成功应用到了上百公里自由空间量子纠缠分发试验中。

纠缠在量子通信网中具有十分重要的意义^[7-10],广泛应用在差错控制、网络互联、路由选择、信令中继、身份认证等方面。文献[11]提出了一种基于纠缠的量子自动重传请求(Automatic Repeat Request, ARQ)协议,可以有效地提高数据链路层的最大吞吐量和信道利用率。文献[12]提出了一种新颖的三方量子停止等待及自动选择重传策略。文献[13]提出了一种基于远程传态的量子路由策略,将量子通信网的范围进行了有效的扩展。文献[14]提出的量子信令中继网络模型,借助纠缠交换,解决了噪声背景下的量子信令远程传输问题,实现了量子信令的可靠传输。

目前的研究工作主要集中在为量子通信提供高纠缠度、高亮度的纠缠粒子对以及提高纠缠分发的距离等方面^[15]。然而,如何为各种基于纠缠的量子通信协议提供可靠的纠缠连接,其相关研究尚未完全展开。为此,本文在纠缠交换的基础上提出一种远程量子链路建立策略,结合纠缠纯化的应用实现远距离节点间的端到端连接,并对本策略下链路的时延及吞吐量进行分析与仿真。

2 基于状态矩阵的链路模型

2.1 链路中的两类节点

在基于纠缠交换的量子通信网中,通信链路由通信信道和网络节点组成。端到端的链路模型如图

1 所示,其中,每个椭圆表示节点所在区域,处于相邻椭圆中由线段所连接的黑点表示纠缠粒子对。链路中的节点分为边缘节点和中间节点两类。

(1) 边缘节点

一条链路中收发信息的两个端点。在一条链路中,有且仅有两个边缘节点,如图 1 中的节点 1 和节点 M 。

(2) 中间节点

通信链路中除了边缘节点之外的其余节点,如图 1 中的节点 2,3,⋯, $M-1$ 。

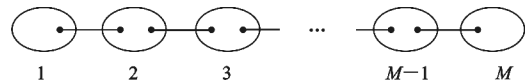


图 1 端到端的链路模型
Fig. 1 The end-to-end link model

2.2 相邻节点间纠缠链路的建立过程

当节点 A 与 B、B 与 C 同时共享纠缠粒子对时,节点 A、B、C 构成如图 2 所示的相邻关系。

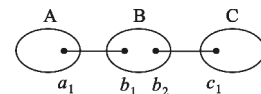


图 2 相邻链路节点间的纠缠关系
Fig. 2 Adjacent relation between link nodes

图 2 中, a_1-b_1 表示节点 A 与 B 之间的纠缠粒子对, b_2-c_1 表示节点 B 与 C 之间的纠缠粒子对。在中间节点 B 处,对粒子 b_1 和 b_2 进行操作和测量,从而建立起节点 A 与节点 C 之间的纠缠关联,其量子线路如图 3 所示。

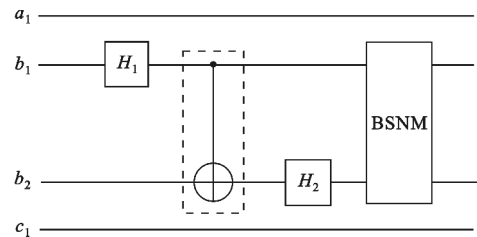


图 3 纠缠交换线路图
Fig. 3 Circuit diagram of entanglement swapping

图 3 中, H_1 、 H_2 表示量子 hadamard 门,虚线框内为一个受控非门。将通过 H_1 后的 b_1 作为控制比特对 b_2 进行受控非操作,然后将 b_2 通过 H_2 并与 b_1 一起作非破坏 Bell 测量(Bell State Nondemolition Measurement, BSNM)^[16]。

令粒子 a_1 和 b_1 、粒子 b_2 和 c_1 的初始状态分别为

$$\begin{cases} |\varphi^+\rangle_{a_1b_1} = \frac{|00\rangle_{a_1b_1} + |11\rangle_{a_1b_1}}{\sqrt{2}} \\ |\varphi^+\rangle_{b_2c_1} = \frac{|00\rangle_{b_2c_1} + |11\rangle_{b_2c_1}}{\sqrt{2}} \end{cases}, \quad (1)$$

则系统的初始状态为

$$|\varphi\rangle_{a_1b_1b_2c_1}=|\varphi^+\rangle_{a_1b_1}\otimes|\varphi^+\rangle_{b_2c_1}。 \tag{2}$$

b_2 通过 H_2 后系统状态变为

$$\begin{aligned} |\varphi'\rangle_{a_1b_1b_2c_1} = & \frac{1}{2} \left[\frac{|00\rangle_{b_1b_2} + |11\rangle_{b_1b_2}}{\sqrt{2}} \frac{|00\rangle_{a_1c_1} - |11\rangle_{a_1c_1}}{\sqrt{2}} + \right. \\ & \frac{|01\rangle_{b_1b_2} + |10\rangle_{b_1b_2}}{\sqrt{2}} \frac{|00\rangle_{a_1c_1} + |11\rangle_{a_1c_1}}{\sqrt{2}} + \\ & \frac{|00\rangle_{b_1b_2} - |11\rangle_{b_1b_2}}{\sqrt{2}} \frac{|01\rangle_{a_1c_1} + |10\rangle_{a_1c_1}}{\sqrt{2}} + \\ & \left. \frac{|01\rangle_{b_1b_2} - |10\rangle_{b_1b_2}}{\sqrt{2}} \frac{|10\rangle_{a_1c_1} - |01\rangle_{a_1c_1}}{\sqrt{2}} \right] = \\ & \frac{1}{2} [|\varphi^+\rangle_{b_1b_2} \otimes |\varphi^-\rangle_{a_1c_1} + |\psi^+\rangle_{b_1b_2} \otimes |\varphi^+\rangle_{a_1c_1} + \\ & |\varphi^-\rangle_{b_1b_2} \otimes |\psi^+\rangle_{a_1c_1} + |\psi^-\rangle_{b_1b_2} \otimes |\psi^-\rangle_{a_1c_1}]。 \tag{3} \end{aligned}$$

随后,测量将粒子 b_1 和 b_2 投影到 4 个相互正交的 Bell 态上,使粒子 a_1 和 b_1 发生塌缩,得到对应状态的纠缠粒子对 a_1-c_1 ,在使用 BSNM 测量的情况下,忽略环境因素,链路中纠缠粒子的总数维持不变,而纠缠粒子之间的距离会不断增长。

基于线性光学的实现方案如图 4 所示。

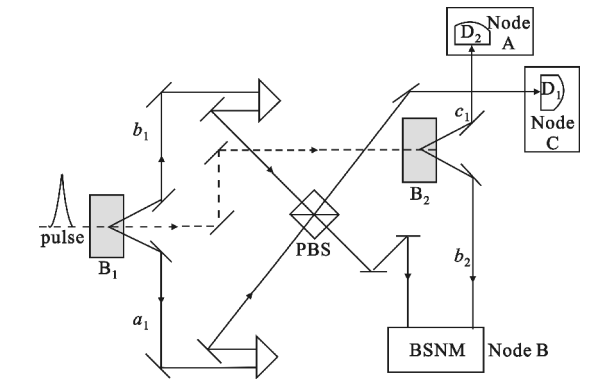


图 4 线性光学实现方案

Fig. 4 Implementation scheme based on linear optics

图 4 中:脉冲频率为 80 MHz^[4];B₁ 和 B₂ 为偏硼酸钡晶体;PBS 是分束器;D₁、D₂ 为探测器。脉冲通过 B₁ 后产生第一对纠缠光子 a_1 和 b_1 ,随后进入 B₂ 产生第二对纠缠光子 c_1 和 b_2 。 a_1 通过 PBS 进入节点 A 处的探测器 D₁, c_1 进入节点 C 处的探测器 D₂, b_2 和 b_1 随后进入节点 B 处的 BSNM 装置。测量塌缩后,原本独立的粒子 a_1 和 c_1 处于最大纠缠态,当测量结果为 $|\varphi^+\rangle$ 、 $|\psi^+\rangle$ 、 $|\varphi^-\rangle$ 、 $|\psi^-\rangle$ 时, a_1c_1 的状态分别为 $|\varphi^-\rangle$ 、 $|\varphi^+\rangle$ 、 $|\psi^+\rangle$ 、 $|\psi^-\rangle$ 。

2.3 相邻节点纠缠建立的矩阵分析

为便于分析,将相邻节点间的链路长度归一化

并定义纠缠长度为纠缠粒子之间的链路长度。若两个纠缠粒子处于同一个节点,则认为其纠缠长度为 0,规定单个纠缠粒子的纠缠长度为 0。 M 个节点的纠缠链路可表示为 $M\times M$ 的矩阵:

$$\boldsymbol{E}'(n)=\begin{pmatrix} e'_{11}(n) & \cdots & e'_{1M}(n) \\ \vdots & e'_{ij}(n) & \vdots \\ e'_{M1}(n) & \cdots & e'_{MM}(n) \end{pmatrix}。 \tag{4}$$

式中: $e'_{ij}(n)$ 为节点 i 和 j 之间的纠缠长度; $e'_{ij}=|i-j|$; n 表示链路状态,满足 $\boldsymbol{E}'(n)=\boldsymbol{E}'^T(n)$ 。

易得纠缠长度的无方向性及 $e'_{ij}(n)=e'_{ji}(n)$,故取 $\boldsymbol{E}'(n)$ 的下三角矩阵 $\boldsymbol{E}(n)$ 作为链路的状态矩阵,则有

$$\boldsymbol{E}(0)=\begin{pmatrix} 0 & & & & \\ 1 & 0 & & & \\ & 1 & \ddots & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ 0 & \cdots & & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}_{M\times M}。 \tag{5}$$

对相邻节点间纠缠交换的矩阵描述如下:当 $e_{ij}(n)\neq 0$,若存在 $e_{ki}(n)\neq 0$ 时,令

$$e_{kj}(n+1)=k-j,e_{ij}(n)=0,e_{ki}(n)=0, \tag{6}$$

则相邻节点 k 和 j 之间的纠缠关联由中间节点 i 建立完成;若不存在 $e_{ki}(n)\neq 0$,则节点 i 不进行任何操作。

3 端到端的纠缠链路建立

基于上述分析,现考虑整条链路的纠缠建立过程。图 5 是链路的协议栈。

上层应用
纯化控制(PC)
纠缠交换控制(ESC)
纯化控制(PC)
纠缠制备(EM)
经典信息辅助(CIA)

图 5 链路协议栈

Fig. 5 Protocol stack of link

链路的协议栈分为 6 层,最下层为第一层,即经典信息辅助(CIA),它在链路的建立过程中起辅助作用。第二层为纠缠制备(EM),表示相邻节点纠缠对的制备和共享。第三层和第五层为纯化控制

(PC),用来控制节点的纠缠纯化。第四层为纠缠交换控制(ESC),用来控制节点间的纠缠交换。最上层为应用层,表示各种基于纠缠的应用。

图 6 是一个 7 节点链路的建立过程,其中, $PC(x)$ 和 $ESC(x)$ 表示 $E(x)$ 状态的纠缠纯化和纠缠交换, $x \in \mathbf{N}$ 。 $PC(-1)$ 表示进入 $E(0)$ 前的纯化操作。在控制命令下,链路经历了三个阶段。规定链路初始化之前,每个节点向下行相邻节点发送纠缠粒子,进行纯化操作,当缓存的纠缠对数量满足协议

启动需要的下限时,链路进入初始状态 $E(0)$ 。随后按以下步骤进行:

- (1)在节点 2、4、6 上进行纠缠交换,随后在节点 1 和 3、3 和 5、5 和 7 之间进行纯化,链路进入状态 $E(1)$;
- (2)在节点 3 上进行纠缠交换,并在节点 1 和 5 之间进行纯化,链路进入状态 $E(2)$;
- (3)在节点 5 上进行纠缠交换,并在节点 1 和 7 之间进行纯化。链路进入状态 $E(3)$,建立完成。

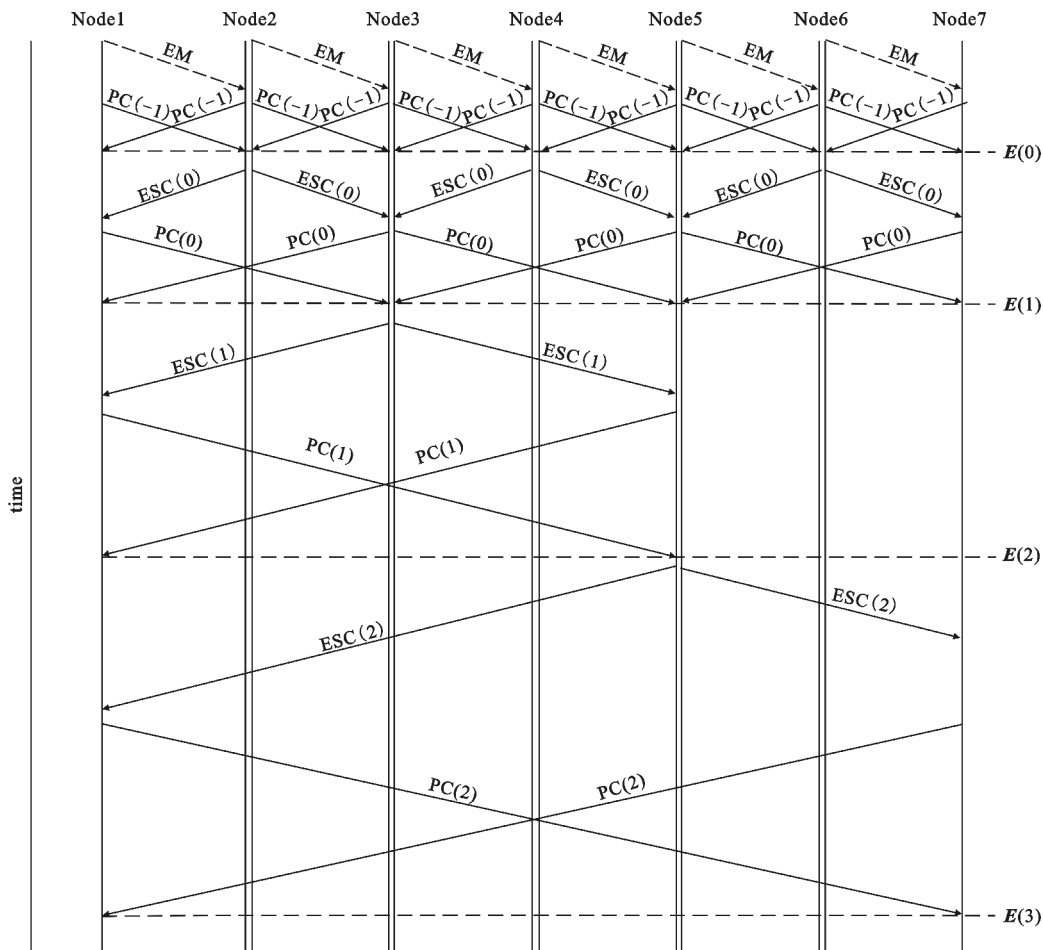


图 6 链路建立流程图
Fig. 6 Process diagram of link construction

对应于图 6 的链路状态矩阵为

$$E(0)=\begin{pmatrix} 0 & & & & & & \\ 1 & 0 & & & & & \\ 0 & 1 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$E(1)=\begin{pmatrix} 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & & & & & \\ 2 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{E}(2)=\begin{pmatrix} 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{E}(3)=\begin{pmatrix} 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}。 \quad (10)$$

- 对于一般情况下链路的建立过程,其算法如下:
- (1) 对于状态矩阵 $\mathbf{E}(x)$, $x \geq 0$, 取最小行标的非零元素 $e_{ij}(x)$, 若存在 $e_{ki}(x) \neq 0$, 则执行步骤 2, 否则转入步骤 4;
 - (2) 令 $e_{kj}(x+1) = k-j$, $e_{ij}(x) = 0$, $e_{ki}(x) = 0$, 记录当前节点 i, k, j ;
 - (3) 判断当前 $\mathbf{E}(x)$ 中是否存在非零元素, 若存在, 则转回步骤 1, 否则对记录的所有节点 i 进行纠缠交换操作, 令节点 k 和 j 进行纠缠纯化操作并进入步骤 4;
 - (4) 链路状态矩阵变为 $\mathbf{E}(x+1)$;
 - (5) 重复执行上述步骤, 直至纠缠链路建立完成。

4 仿真分析

令 F 表示保真度, 则纯化前的光子密度矩阵为

$$\hat{\rho} = F|\varphi^+\rangle\langle\varphi^+| + \frac{1-F}{3}(|\psi^+\rangle\langle\psi^+| + |\psi^-\rangle\langle\psi^-| + |\varphi^-\rangle\langle\varphi^-|)。$$

(11)

根据 Bennett 等提出的纠缠纯化方案, 纯化前的保真度 F_r 与纯化后的保真度 F_{r+1} 满足

$$F_{r+1} = \frac{F_r^2 + \frac{1}{9}(1-F_r)^2}{F_r^2 + \frac{2}{3}F_r(1-F_r) + \frac{5}{9}(1-F_r)^2}。 \quad (12)$$

式中: r 表示纯化的次数, 且有 $\frac{1}{2} < F_r < 1$ 。

取 $\mathbf{E}(0)$ 时刻的保真度 $F_{E(0)}$ 为每级纯化保真度的下限。经过纠缠交换后, 相邻节点间纠缠对的保

真度为

$$F_{\text{ESC}(x)} = \frac{1}{4} \left[1 + 3p_1^2 p_2 \frac{4\eta^2 - 1}{3} \left(\frac{4F_{\text{PC}(x-1)} - 1}{3} \right)^2 \right]。$$

(13)

参数 p_1 、 p_2 和 η 分别为纯化操作进行单比特、两比特量子操作和量子测量的成功率。

链路建立过程中, 由于信道的退极化作用及多变的环境因素, 每轮量子操作成功率变化较为复杂, 为了便于分析, 采用独立同分布假设。令节点产生纠缠粒子的成功率为 p_{em} , 进行纠缠交换的成功率为 p_{esc} , 将保真度从 F_{esc} 纯化到 F_{pc} 的次数为 t , 成功率为 p_{pc} 。对于状态矩阵为 $\mathbf{E}(x)$ 的链路, 连接过程所需要的时间包括相邻节点间制备分发纠缠对的平均时间 T_{em} 、进行纠缠交换的平均时间 $T_{\text{esc}}(x)$ 和进行纠缠纯化的平均时间 $T_{\text{pc}}(x)$ 。假设链路成功产生纠缠对的次数、成功进行纠缠交换和完成纠缠纯化的次数均服从指数分布。

对于 $x \geq 0$, 链路建立所需的总平均时间为

$$T(x) = T_{\text{em}} + T_{\text{esc}}(x) + T_{\text{pc}}(x) = T_{\text{q}} + T_{\text{c}}(x)。$$

(14)

式中: T_{q} 表示量子操作和测量的时延; $T_{\text{c}}(x)$ 表示各种经典信息的传输时延; 且有

$$T_{\text{q}} = 4\tau_{\text{op}}/p_{\text{esc}} + 3t\tau_{\text{op}}/p_{\text{pc}}。$$

(15)

式中: τ_{op} 为完成一次量子操作或测量的时间。采用停等式 ARQ 协议传输经典信息, 记 $\tau_{\text{tr}} = l/c$, 则

$$T_{\text{c}}(x) = \begin{cases} \frac{1+p}{1-p}\tau_{\text{tr}}\left(\frac{2^x}{p_{\text{esc}}} + \frac{2^{x+1}t}{p_{\text{pc}}}\right), & 0 \leq x < \kappa \\ \frac{1+p}{1-p}\tau_{\text{tr}}\left(\frac{2^x}{p_{\text{esc}}} + \frac{(N-1)t}{p_{\text{pc}}}\right), & x = \kappa \end{cases}。$$

(16)

式中: N 表示链路节点数; κ 为状态数, 满足 $2^\kappa + 1 < N \leq 2^{\kappa+1} + 1$, $\kappa \in \mathbf{N}$; c 表示光速; p 为误帧率; l 为相邻节点间的平均距离。

由式 (14) 得

$$T(x) = \begin{cases} (4\tau_{\text{op}} + \frac{1+p}{1-p}2^x\tau_{\text{tr}})/p_{\text{esc}} + t(3\tau_{\text{op}} + \frac{1+p}{1-p}2^{x+1}\tau_{\text{tr}})/p_{\text{pc}}, & 0 \leq x < \kappa \\ (4\tau_{\text{op}} + \frac{1+p}{1-p}2^x\tau_{\text{tr}})/p_{\text{esc}} + t\left(3\tau_{\text{op}} + \frac{(1+p)(N-1)}{1-p}\tau_{\text{tr}}\right)/p_{\text{pc}}, & x = \kappa \end{cases},$$

(17)

则链路时延为

$$T_{\text{N}} = \tau_{\text{em}}/p_{\text{em}} + \sum_{x=0}^{\kappa} T(x) = \tau_{\text{em}}/p_{\text{em}} + \left[4(\kappa+1)\tau_{\text{op}} + \frac{(1+p)(2^{\kappa+1}-1)}{1-p}\tau_{\text{tr}} \right]/p_{\text{esc}} + \left[3t(\kappa+1)\tau_{\text{op}} + \frac{(1+p)t(2^{\kappa+1}+N-3)}{1-p}\tau_{\text{tr}} \right]/p_{\text{pc}}。$$

(18)

式中: τ_{em} 为纠缠分发时延。

令 $P_N = p_{em} (p_{esc} p_{pc})^{\kappa+1}$, 则链路的吞吐量为

$$S_N = 1 / (T_N / P_N)。(19)$$

综上所述,链路共经历了从 $E(0)$ 到 $E(\kappa)$ 共 $\kappa+1$ 个状态。 N_{min} 为区间的最小节点数, T 和 S 分别表示时延及吞吐量。令 $\tau_{em} = 0.3 \mu s, \tau_{op} = 2 \mu s, \tau_p = 0.1 \mu s, l = 1 \text{ km}, F_{ESC(0)} = 0.98$, 忽略 $T_{pc}(-1)$, 得到对应不同状态数链路节点的时延及吞吐量如表1所示。

表1 对应不同状态数链路节点的时延及吞吐量

Tab.1 Time delay and throughput of links of different node number

κ	N_{min}	T/ms	$S/(\text{kb} \cdot \text{s}^{-1})$
0	3	0.062	16.051
1	4	0.141	7.094
2	6	0.266	3.755
3	10	0.486	2.062
4	18	0.890	1.123
5	34	1.669	0.599
6	66	3.194	0.590

对时延和吞吐量与节点数关系的仿真结果如图7所示。

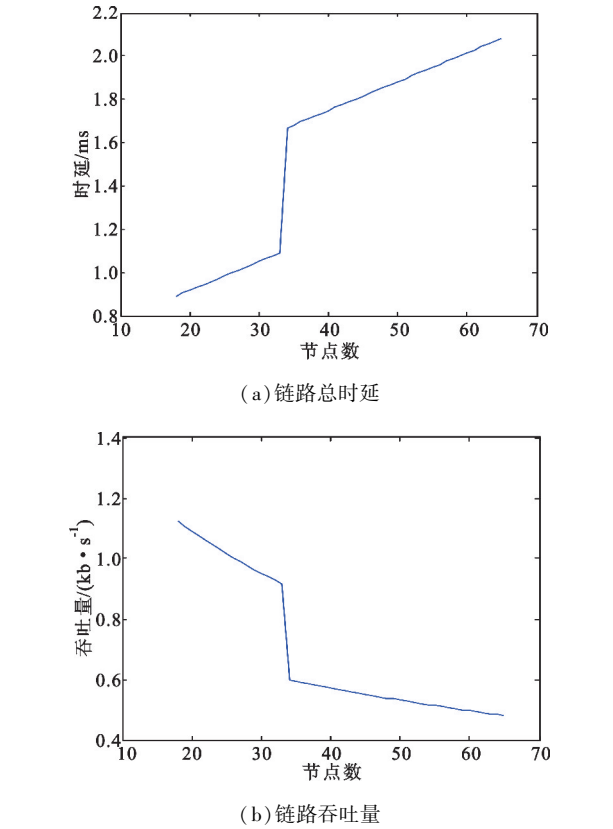


图7 时延和吞吐量与节点数 N 的关系
Fig.7 Time delay and node number with N

由图7知, $N = 33$ 时, $T_{33} = 1.0903 \text{ ms}, S_{33} =$

0.9172 kb/s 。 $N = 34$ 时, $T_{34} = 1.6690 \text{ ms}, S_{34} = 0.5992 \text{ kb/s}$, T 和 S 发生明显变化。原因是 $N = 33$ 时,链路建立经历了 $E(0) - E(4)$ 状态; $N = 34$ 时,链路经历了 $E(0) - E(5)$ 状态,节点数相邻而区间不同,其每个状态内的节点流程和参与次序有明显区别,从而使得链路时延和吞吐量差异很大,具体体现为式(18)中参数 κ 的不同取值。因此,分组交换在进行路由选择时,同一连接中不同分组通过链路应尽可能处于相同区间内,避免时延和吞吐量的深衰落。此外,当链路节点数非常大时,不仅控制流程会较为复杂,链路性能也会有明显下降,导致通信质量受到严重影响。例如,当 $N = 128$ 时, $T_{128} = 4.021 \text{ ms}, S_{128} = 0.2487 \text{ kb/s}$ 。因此,应根据业务类型和服务质量要求合理控制节点数量。

考虑经典过程对链路性能的影响,取 $N = 5$ 分析不同误帧率条件下链路性能随平均距离的变化情况,如图8所示。

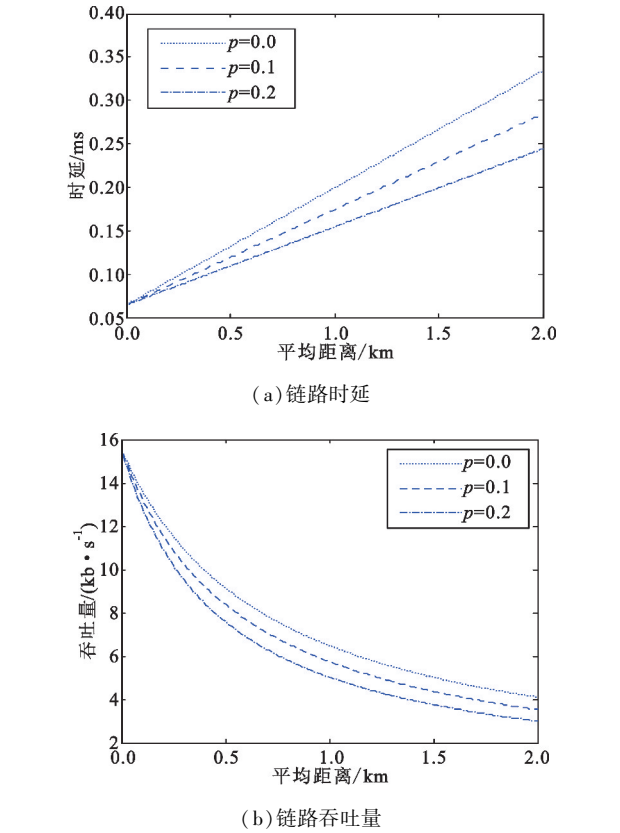


图8 时延和吞吐量随 l 和 p 的变化曲线
Fig.8 Time delay and node number with l and p

由图8可以看出,节点距离越大,误帧率越高,则经典信息传输的时延就越大,错误概率越高,从而使得节点纠缠交换和纠缠纯化的成功率下降,导致时延增加,吞吐量减小。

系统性能还会受到 $p_{em} \setminus p_{esc}$ 和 p_{pc} 的影响, 因为 p_{em} 只发生在初始化阶段, 所以 p_{esc} 和 p_{pc} 起主要作用, 其仿真如图 9 所示。从图中可以看出, 为了将保真度纯化到通信阈值, 往往需要执行多次纯化操作,

因而链路对于纯化的成功率更为敏感。为了降低链路时延和提高链路吞吐量, 需要提升设备效率, 减少量子操作和测量耗费的时间, 提高纠缠交换的成功率和改进纯化策略。

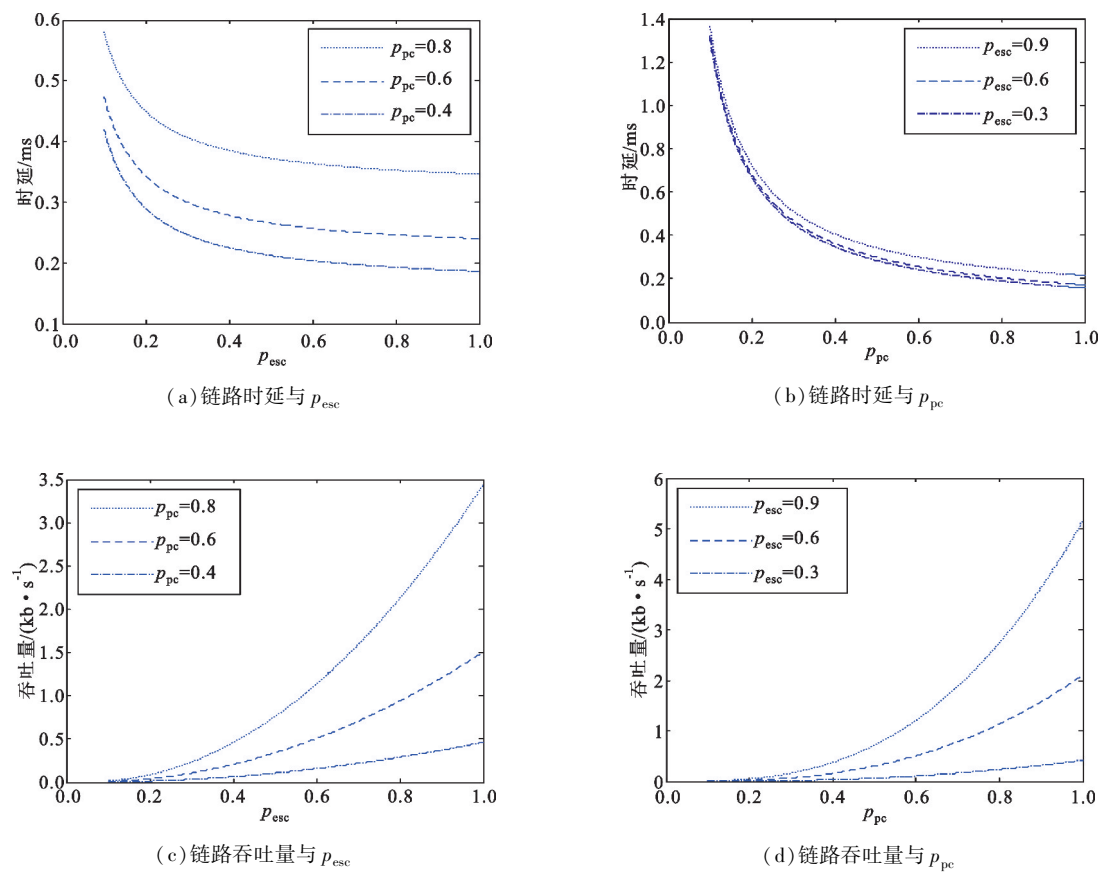


图 9 链路时延和吞吐量与 $p_{esc} \setminus p_{pc}$ 的关系
Fig. 9 Time delay and node number vs. p_{esc} and p_{pc} , respectively

5 结束语

本文提出的链路建立策略采用了并行的纠缠建立方式, 相对于过去节点逐一进行操作的方法, 提高了系统性能。在已有的并行操作策略中, 大都采用节点数为 2 的整数次幂假设, 而现实中经常面临着更一般的情况。为此, 本文提出矩阵下的表示和控制算法, 引入链路状态参数, 以控制流程复杂度的增加保持了并行建立的优势, 但不足之处是时延和吞吐量会在状态区间临界点处有较大的变化, 我们会在下一步的研究中进行改进, 不断减小这种变化的幅度, 为纠缠量子通信协议提供可靠的纠缠链路。

参考文献:

[1] 尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

YIN Hao, HAN Yang. Quantum communication: principle and technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)

[2] 刘林曜, 胡孟军, 吕洪君, 等. 基于任意 Bell 态的量子密钥分配[J]. 量子电子学报, 2013, 30(4): 439-444.

LIU Linyao, HU Mengjun, LYU Hongjun, et al. Quantum key distribution protocol based on any Bell states [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(4): 439-444. (in Chinese)

[3] 龙桂鲁, 王川, 李岩松, 等. 量子安全直接通信[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(4): 332-342.

LONG Guilu, WANG Chuan, LI Yansong, et al. Quantum secret direct communication [J]. Scientia Sinica Physics, Mechanics & Astronics, 2011, 41(4): 332-342. (in Chinese)

[4] MA X S, HERBST T, SHEIDL T, et al. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward [J]. Nature, 2012, 489(7415): 269-273.

[5] TAKAHIRO I, NOBUYUKI M, OSAMU T, et al. Entangle-

- ment distribution over 300km of fiber [J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23241–23249.
- [6] 周飞, 曹原, 印娟, 等. 基于百公里量子通信实验的可移动式一体化纠缠源 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(2): 225–229.
- ZHOU Fei, CAO Yuan, YIN Juan, et al. Integrated and portable entanglement source used for quantum communication over 100 kilometers [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(2): 225–229. (in Chinese)
- [7] YU X T, ZHANG Z C, XU J. Distributed wireless quantum communication networks with partially entangled pairs [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 66–73.
- [8] METWALLY N. Entangled network and quantum communication [J]. Physics Letters A, 2011, 375(48): 4268–4273.
- [9] WANG K, YU X T, LU S L, et al. Quantum wireless multihop communication based on arbitrary Bell pairs and teleportation [J]. Physical Review A, 2014, 89(2): 767–771.
- [10] 李渊华, 刘俊昌, 聂义友. 基于 W 态的跨中心量子网络身份认证方案 [J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1617–1620.
- LI Yuanhua, LIU Junchang, NIE Yiyu. Quantum identification scheme of cross-center based on W-state [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1617–1620. (in Chinese)
- [11] 周南润, 曾宾阳, 王立军, 等. 基于纠缠的选择自动重传量子同步通信协议 [J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2193–2199.
- ZHOU Nanrun, ZENG Binyang, WANG Lijun, et al. Selective automatic repeat quantum synchronous communication protocol based on quantum entanglement [J]. Acta Physics Sinica, 2010, 59(4): 2193–2199. (in Chinese)
- [12] ZHOU N R, CHENG H L, GONG L H, et al. Three-party quantum network communication protocols based on quantum teleportation [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2014, 53(4): 1387–1403.
- [13] 周小清, 邬云文, 赵晗. 量子隐形传态网络的互联与路由策略 [J]. 物理学报, 2011, 60(4): 35–40.
- ZHOU Xiaoqing, WU Yunwen, ZHAO Han. Quantum teleportation internetworking and routing strategy [J]. Acta Physics Sinica, 2011, 60(4): 35–40. (in Chinese)
- [14] 连涛, 聂敏. 基于纠缠交换的量子信令中继网络模型及仿真 [J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1251–1255.

LIAN Tao, NIE Min. Model and simulation of entanglement signaling repeater network based entanglement swapping [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1251–1255. (in Chinese)

- [15] JIN X M, REN J G, YANG B, et al. Experimental free-space quantum teleportation [J]. Nature Photonics, 2012(4): 376–381.

- [16] 丁东, 闫凤丽. 基于弱非线性实现非破坏性测量两光子 Bell 态及三光子 Greenberger–Horne–Zelinger 态 [J]. 物理学报, 2013, 62(10): 27–31.

DING Dong, YAN Fengli. Quantum nondemolition measurement of two-photon Bell-state and three-photon Greenberger–Horne–Zelinger-state based on weak nonlinearities [J]. Acta Physics Sinica, 2013, 62(10): 27–31. (in Chinese)

作者简介:



许敏 (1991—), 女, 陕西人, 硕士研究生, 主要研究方向为量子通信;

XU Min was born in Shaanxi Province, in 1991. She is now a graduate student. Her research concerns quantum communication.

Email: 1145045705@qq.com

聂敏 (1964—), 男, 陕西人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为量子通信、移动通信;

NIE Min was born in Shaanxi Province, in 1964. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns quantum communication and mobile communication.

杨光 (1977—), 女, 陕西人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为量子通信和通信网;

YANG Guang was born in Shaanxi Province, in 1987. She is now a lecturer and currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns quantum communication and communication network.

裴昌幸 (1945—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、网络测量、量子通信。

PEI Changxing was born in Shaanxi Province, in 1945. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns wireless communication, network measurement and quantum communication.