

一种基于分层的量子分组传输方案及性能分析

王林飞 聂敏 杨光 张美玲 裴昌幸

A scheme of quantum packet transmission and its performance analysis based on hierarchical

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 130302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.130302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

时域脉冲平衡零拍探测器的高精度自动平衡

[Highprecision auto-balance of the time-domain pulsed homodyne detector](#)

物理学报.2016, 65(10): 100303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100303>

基于低Q腔光子Faraday旋转的远程态制备

[Remote state preparation via photonic Faraday rotation in low-Q cavities](#)

物理学报.2016, 65(2): 020302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020302>

降雨背景下诱骗态协议最优平均光子数的变色龙自适应策略

[Optimal mean photon number of decoy state protocol based on chameleon self-adaptive strategy under the background of rainfall](#)

物理学报.2016, 65(2): 020303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020303>

多跳噪声量子纠缠信道特性及最佳中继协议

[Characteristics of multi-hop noisy quantum entanglement channel and optimal relay protocol](#)

物理学报.2015, 64(24): 240304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240304>

基于分组交换的量子通信网络传输协议及性能分析

[Transmission protocol and its performance analysis of quantum communication network based on packet switching](#)

物理学报.2015, 64(21): 210303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210303>

一种基于分层的量子分组传输方案及性能分析*

王林飞^{1)†} 聂敏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)

(2016年3月10日收到; 2016年4月7日收到修改稿)

大规模量子通信网络中, 采用量子分组传输技术能有效提升发送节点的吞吐量, 提高网络中链路的利用率, 增强通信的抗干扰性能. 然而量子分组的快速传输与路由器性能息息相关. 路由器性能瓶颈将严重影响网络的可扩展性和链路的传输效率. 本文提出一种量子通信网络分层结构, 并根据量子密集编码和量子隐形传态理论, 给出一种基于分层的量子分组信息传输方案, 实现端到端的量子信息传输. 该方案先将量子分组按照目的地址进行聚类, 再按聚类后的地址进行传输. 仿真结果表明, 基于分层的量子分组信息传输方案能够有效减少量子分组信息在量子通信网络中的传输时间, 并且所减少的时间与量子路由器性能与发送的量子分组数量有关. 因此, 本文提出的量子分组信息传输方案适用于大规模量子通信网络的构建.

关键词: 量子通信, 分组传输, 量子隐形传态**PACS:** 03.67.Hk, 42.50.Dv**DOI:** 10.7498/aps.65.130302

1 引言

量子通信是利用量子效应建立的新型信息传输方式^[1-3], 由于其无条件的信息安全性和传输的高效性, 可广泛应用于国防、金融和通信系统中. 在量子计算机网络的构建中, 采用量子IP技术^[4,5]进行数据传输, 可提高量子数据传输效率, 提升网络用户的服务体验, 促进量子通信的大规模应用. 因此, 设计合理的量子信息传输方案十分必要. 1984年, Yurke和Denker^[6]首次提出了量子通信网络的概念. 1997年, Cirac等^[7]利用光子实现远距离通信网节点间量子纠缠分发与量子态传输. 2002年, Chip^[8]利用量子密钥分发原理设计了一种基于点对点信息传输的量子通信网络. 同年, 清华大学Long和Liu^[9]提出了第一个量子安全直接通信的协议, 不需要首先建立密钥, 直接在量子信道安全地传输秘密信息. 2003年, 清华大学Deng等^[10]设

计了量子安全直接通信方案, 该方案将量子信息分为检查序列和信息编码序列进行块传输, 提高了量子通信效率. 2004年, BBN公司建立了世界上第一个量子通信实验网络^[11], 设有6个量子服务器, 进行安全通信实验. 同年, Deng和Long^[12]提出了基于单光子的量子安全直接通信方案, 由于不需要量子纠缠对, 该方案更容易实现. 2006年, Dianati和Alléaume^[13]发表文章称欧洲联合小组将建立全球量子安全通信网络SECOQC, 并提出了其通信协议, 该量子通信网于2008年建成, 实现6个节点, 8条链路的量子信息传输. 王剑等^[14]和王天银等^[15]提出和改进的多方控制的量子直接安全协议是一种特殊用途的量子通信方式, 为量子通信网络提供了新的途径. 龙桂鲁等^[16,17]对量子安全直接通信方案进行了总结, 论证了未来量子直接安全通信实现的可能性. 2009年, 中国科技大学在芜湖市建立了世界上首个“量子政务网”^[18], 实现了3个电话用户之间的安全保密通信. 同年, 中国科技大学量

* 国家自然科学基金(批准号: 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(批准号: 2015KW-013)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 304375220@qq.com

子重点实验室许方星等^[19]设计了基于量子密钥分发系统的多层级量子密码城域网,该网络能满足多种数据的安全传输.2015年,山西大学和清华大学联合研究组首次实验实现了基于单光子的量子安全直接通信^[20],并验证了噪声背景下该量子通信协议的安全性.当量子信息物理传输问题解决后,科学家们开始研究数据链路层及高层协议.2009年,南昌大学曾宾阳^[21]对量子数据链路层通信协议进行了设计,有效提高了链路吞吐量和信道利用率.2014年,西安电子科技大学刘晓慧等^[22]提出一种无线量子通信网络路由方案,实现移动节点间量子态无线远程传输.同年,王建民^[23]对量子通信网络架构进行了研究,提出了分布式量子网络构建方案,该方案增强了网络的承载能力.2015年,东南大学陈鹏等^[24]提出了基于纠缠态的量子通信网络模型,并对其信道建立速率进行了计算分析.同年,马鸿洋等^[25]利用 Greenberger-Horne-Zeilinger 量子纠缠态建立了一种噪声背景下量子直接通信网络,可实现网络中任意两个节点之间的量子信息安全传输.

以上研究成果采用了多种技术实现量子通信网络的构建,但在量子超远距离通信中,量子通信网络中用户较多、数据量庞大时,不能实现量子信息快速有效传输.经典计算机网络中的数据传输采用无分类编址(CIDR)将分组数据的地址分为网络地址和主机地址^[26],网络中的路由器仅需读取网络地址就能实现对分组数据的转发,而主机地址的作用在于子网中计算机的区分.CIDR技术极大地减少了路由器之间信息的交换,提高了分组数据的传输性能.本文将量子分组网按照网络规模分为量子局域网、量子城域网和量子广域网,并提出一种基于分层的量子分组传输方案.该方案在量子城域网中应用了CIDR原理,将量子分组进行地址聚类.所不同的是,在经典计算机网络中,分组是单独路由处理的,而在量子分组网中,量子分组是聚类为量子簇后,进行统一路由转发.本文所提方案不仅可实现量子分组的安全可靠传输,而且能有效减少量子分组在网络中的传输时间.

2 量子网络分层结构

2.1 经典网络分层结构

在计算机网络中,按照网络的规模和覆盖范围,可以分为局域网(LAN)、城域网(MAN)和广域

网(WAN).局域网是指在一个地理局部范围内,如一个公司、学校或者机构,将各种计算机、相关外部设备以及数据库等通过网络互相联接起来,组成计算机通信网.局域网可以通过数据通信网或专用数据电路,与远方的局域网、数据库或处理中心相连接,构成一个大范围的信息处理系统.城域网可以说是大型的局域网,通常会使用与局域网相似的技术.城域网能覆盖一个城市或者更大的区域,既可能是私有的也可能是公用的.城域网可以支持数据和声音,并且可能涉及当地的有线电视网.广域网通常会跨接很大的地理范围,可能是一个国家或者一个区域.广域网连接着不同区域的城域网,为城域网之间的相互通信提供支撑,提供超远距离的通信,是互联网的核心网络.

2.2 量子分组网络分层结构

量子分组网络中,采用类似于经典网络的分层结构进行量子信息传输,可以实现量子分组网络中数据的快速分类传输.量子分组网络中的分层结构如图1所示.将量子分层网络架构分为三层,分别为量子局域网、量子城域网和量子广域网.量子通信网中的每个路由设备均有网络地址,所有用户都仅存在于量子局域网中,每个用户也拥有网络地址,同一个量子局域网的用户及设备的网络地址同属一个网段;多个量子局域网构成量子城域网,量

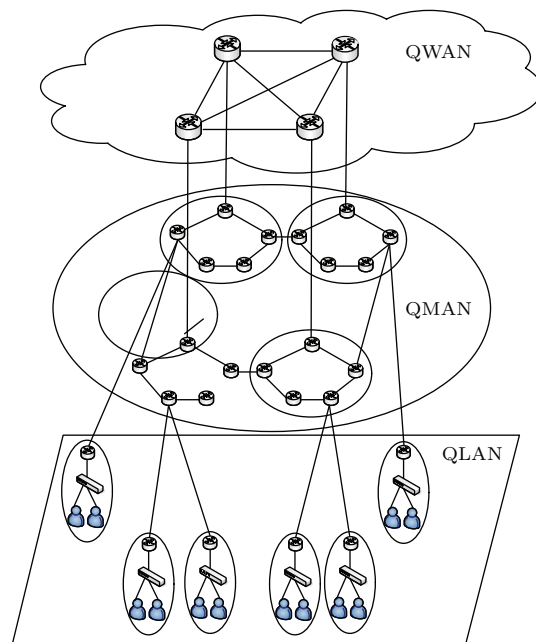


图1 量子分组网络分层结构

Fig. 1. The hierarchical structure of quantum packet network.

子城域网以子网模式连接到量子广域网;量子城域网与量子广域网中路由设备网络地址统一进行分配.

3 量子分组格式及量子簇格式

3.1 量子分组格式

结合经典计算机网络中IPv6分组格式,根据量子分组路由与量子态传输的特点,同时保证与现有的IPv6地址相兼容,量子分组格式如图2所示.由于量子数据链路层能够实现量子比特的透明传输,因此我们所考虑的量子分组格式不包含差错控

制,实现上层量子数据在量子通信网中的快速可靠传输.

目的地址:量子分组传输的目的地址,64位量子位,实现128位二进制地址编码.

流标识:2个量子位,区分量子分组和量子簇,也可实现不同业务对网络的需求.

负载长度:16个量子位,表示有效数据长为0—65535个字节.

源地址:量子分组的发送地址,64位量子位,实现128位二进制地址编码.

扩展位:8个量子位,为以后业务扩展预留.

有效数据:0—524280个量子位,实现最多65535个字节数据传输.

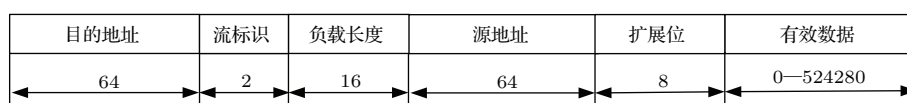


图2 量子分组格式

Fig. 2. The format of quantum packet.

3.2 量子簇格式

量子分组在量子通信网络中传输时,需要在量子路由器进行分组聚合和分组分解.量子路由器根据网络的量子分组目的地址和分组数量来选择进行分组聚合,聚合后分量子分组成为量子簇,量子簇的格式如图3所示.

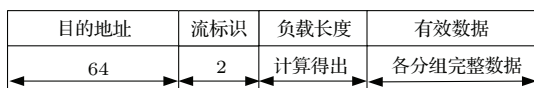


图3 量子簇格式

Fig. 3. The format of quantum packet cluster.

目的地址:量子簇传输的目的地址,64位量子位.

流标识:2个量子位,区分量子分组和量子簇,也可实现不同业务对网络的需求.

负载长度:根据所含量子分组中负载长度进行计算得出.

有效数据:各量子分组的完整数据.

4 基于分层的量子分组传输方案

量子分组的传输按以下步骤进行传输:

1) 信息发送端发送量子分组,量子分组信息分为两段:一段为量子分组头信息,另一段为量子数据信息.量子分组头信息包括:目的地址、负载长度、源地址、流标识、扩展位,采用密集编码^[27]方式传输;量子数据信息为有效数据长度,采用量子隐形传态进行传输.

2) 假设某用户Alice所要发送的一个量子分组,其产生量子纠缠对序列 A_i 和 B_i ($i = 0, 1, 2, \dots, k$),表示为

$$|\Phi^+\rangle_{A_i B_i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_{A_i} 1_{B_i}\rangle + |1_{A_i} 0_{B_i}\rangle) \quad (1)$$

用来建立量子纠缠信道.序列 A_i 留给自己,序列 B_i 通过量子信道发送到量子局域网路由器.假设Alice和路由器之间已经协商好编码规则如下:

$$\sigma_I \rightarrow 00, \sigma_X \rightarrow 01, \sigma_Y \rightarrow 10, \sigma_Z \rightarrow 11, \quad (2)$$

其中

$$\sigma_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3) Alice对自己持有的154个粒子序列 A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 153$)做局域么正操作,由于粒子对序列

A_i 和 B_i 的纠缠性, 则经过操作的后, 粒子对序列 A_i 和 B_i 组成的系统按照如下方式改变:

$$\sigma_I|\Phi^+\rangle_{A_i B_i} = |\Phi^+\rangle_{A_i B_i}, \quad (4)$$

$$\sigma_X|\Phi^+\rangle_{A_i B_i} = |\Psi^+\rangle_{A_i B_i}, \quad (5)$$

$$i\sigma_Y|\Phi^+\rangle_{A_i B_i} = |\Psi^-\rangle_{A_i B_i}, \quad (6)$$

$$\sigma_Z|\Phi^+\rangle_{A_i B_i} = |\Phi^-\rangle_{A_i B_i}. \quad (7)$$

4) Alice 将自己所持有的粒子序列 A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 153$) 发送到量子局域网路由器. 量子局域网路由器接收到粒子序列 A_i 后, 将 A_i 和 B_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 153$) 进行联合 Bell 态测量, 就能确定 Alice 对粒子序列 A_i 所做的操作, 进而读取量子分组头信息.

5) Alice 将量子数据信息编码在粒子序列为 C_j ($j = 0, 1, 2, \dots, r$) 上, 量子数据信息序列 $|\varphi\rangle_{C_j}$ 表示为

$$|\varphi\rangle_{C_j} = \alpha_{C_j}|0\rangle + \beta|1\rangle_{C_j} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, r). \quad (8)$$

Alice 将粒子序列为 C_j 与未发送的粒子序列 A_i ($i = 154, 1, 2, \dots, k$) 进行直积后, 送入受控非门, 再将粒子序列 C_j 通过 Hadamard 门, 以粒子 C_0, A_{154}, B_{154} 为例, 最终的状态变为

$$\begin{aligned} & |\varphi\rangle_{C_0} |\Phi^+\rangle_{A_{154} B_{154}} \\ &= \frac{\alpha_{C_0}}{2} (|0\rangle + |1\rangle)(|01\rangle + |10\rangle) \\ & \quad + \frac{\beta_{C_0}}{2} (|0\rangle - |1\rangle)(|11\rangle + |00\rangle) \\ &= \frac{1}{2} |00\rangle (\alpha_{C_0}|1\rangle + \beta_{C_0}|0\rangle) \\ & \quad + \frac{1}{2} |01\rangle (\alpha_{C_0}|0\rangle + \beta_{C_0}|1\rangle) \\ & \quad + \frac{1}{2} |10\rangle (\alpha_{C_0}|1\rangle - \beta_{C_0}|0\rangle) \\ & \quad + \frac{1}{2} |11\rangle (\alpha_{C_0}|0\rangle - \beta_{C_0}|1\rangle). \end{aligned} \quad (9)$$

6) Alice 通过对所持有的粒子序列 A_i ($i = 154, 1, 2, \dots, k$) 和 C_j ($j = 0, 1, 2, \dots, r$) 进行测量, 通过经典信道将测量结果告知量子局域网路由器, 则路由器按照表 1 的操作, 恢复量子数据信息, 并将量子分组的头信息重新编码后, 与量子数据信息重构量子分组.

7) 量子局域网路由器是量子分组发送的第一级路由, 也是量子分组到达的最后一级路由, 因此对目的地址进行分类, 但不聚类成量子簇. 量子局域网路由器将本地量子分组按照目的地址发送到各下属交换机或终端, 将目的地址为其他网络的量子分组发送到量子城域网路由器.

8) 量子城域网路由器接收本地量子局域网路由器发来的量子分组, 同时接收其他量子城域网和量子广域网发送的目的地址为本量子城域网的量子簇.

表 1 路由器恢复量子数据信息的参照表

Table 1. The reference table of router restore the quantum data information.

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

9) 对于接收到的量子分组, 按其所属的量子城域网网段聚类为量子簇, 例如, 接收到三个量子分组的目的地址分别为 12AB:0:0:CD30:123:4567:0:ABCD, 12AB:0:0:CD30:123:0:89AB:ABCD, 12AB:0:0:CD30:123:45:89AB:CDEF, 则将此三个量子分组聚类为量子簇, 目的地址为 12AB:0:0:CD30::/60. 聚类时要以量子密集编码恢复各量子分组的目的地址和负载长度值, 并计算量子簇的长度, 将聚类后的目的地址和负载长度值同时编码, 添加流标识, 按照图 3 组成量子簇. 其中有效数据为完整的量子分组集合. 各量子分组的量子分组头信息以基态形式进行量子编码.

10) 对于接收到的量子簇, 如果目的地址是本量子城域网, 例如, 本量子城域网的目的地址为 12AB:0:0:CD30::/60, 接收到量子簇目的地址为 12AB:0:0:CD30::/60, 则测量量子簇中每个量子分组的头信息, 假设三个量子分组目的地址分别为: 12AB:0:0:CD30:1-23:4567:0:ABCD, 12AB:0:0:CD30:124:0:89AB:ABCD, 12AB:0:0:CD30:125:45:89AB:CDEF, 则以量子密集编码恢复其量子分组头信息, 按照步骤 1)–6) 将该量子分组按照目的地址发送到量子局域网. 如果接收到的量子簇目的地址不是本量子城域网, 则该量子簇是通过本量子城域网进行路由, 此时, 以量子密集编码恢复其目的地址、流标识和负载长度, 按路由表对量子簇进行转发.

11) 量子广域网中不存在单独的量子分组, 所有的量子分组都以量子簇的形式传输. 对于接收的量子簇, 按目的地址将其分为本网和其他网络. 对于本网络的量子簇, 以量子编码恢复其目的地址、流标识和负载长度后按照目的地址发送到相应的

量子城域网. 对于非本网络的量子簇, 恢复其目的地址、流标识和负载长度后按照路由表转发.

5 基于分层的量子分组传输方案性能分析

5.1 量子分组数与量子路由器数、量子纠缠对数的关系

量子簇传输存在于量子城域网和量子广域网中, 如图4所示.

设量子分组平均有效数据长度为 l , m 个量子分组从目的地址发出, 在量子城域网聚类成为量子簇数量 S , 经过量子城域网、量子广域网转发, 到达目的量子城域网, 分发到目的地址, 所经过的量子城域网和量子广域网路由器数量的平均值为 n , 为计算简便, 设 n 为奇数. 每个分组的量子比

特数为

$$N_1 = l + 154, \quad (10)$$

则需要的量子纠缠对总数为

$$N = 2N_1 \cdot m + \sum_{i=1}^S [64 + 2 + 8 \cdot s_i + N_1 \cdot s_i] \times \left(\frac{n-1}{2} \right), \quad (11)$$

其中 s_i 表示第 i 个量子簇的中量子分组的个数, 满足

$$\sum_{i=1}^S s_i = m. \quad (12)$$

设 $l = 1000$, $m \in [1, 200]$, $S \in [1, m]$, $n \in [3, 30]$, $s_i = m/S$, 传输量子分组数和所需量子纠缠对数、路由器数关系如图5所示.

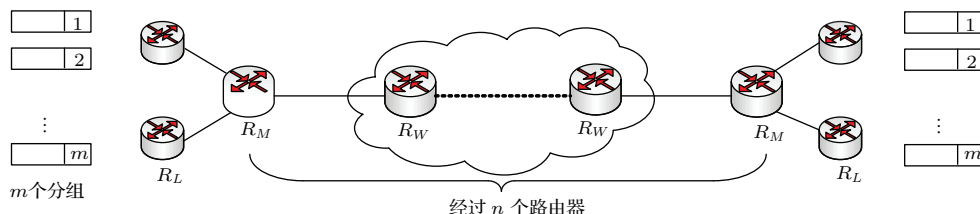


图4 量子分组传输路由示意图

Fig. 4. Schematic diagram of quantum packet transmission routing.

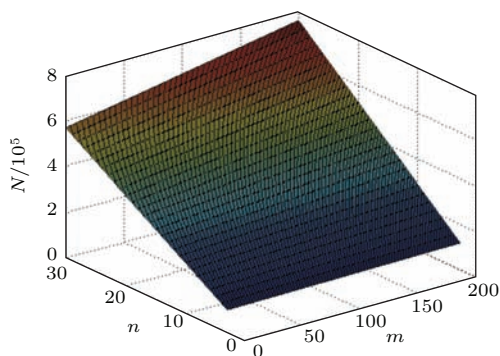


图5 (网刊彩色) 传输量子分组数和路由器数、所需量子纠缠对数的关系

Fig. 5. (color online) Transport quantum packet number and the number of routers, the required quantum entanglement logarithmic relationship.

从图5可以看出, 传输一定量的量子分组所需的量子纠缠对数随着量子分组和量子簇所经过的路由器数量增加而增多. 当路由器个数一定时, 量子分组和量子簇传输过程中需要的量子纠缠对数取决于需要的量子分组数.

5.2 量子分组传输时延分析

设每个分组的隐形传输时间为 T_t , 包括量子纠缠对的产生与分发时间、经典信息的传输时间、Bell基测量时间. 量子分组和量子簇信息读取主要包括: 目的地址、流标识、负载长度, 每个量子位读取时间为 t_r . 量子分组和量子簇信息恢复主要包括: 目的地址、流标识、负载长度, 每个量子位恢复时间为 t_R , 每个量子分组和量子簇的路由选择时间为 T_s . 参照图4, 传输 m 个量子分组到目的地址, 当 m 个分组到达量子城域网路由器时, 需进行排队处理, 根据 $M/M/1$ 型排队算法, 每个分组的平均处理时间为

$$\begin{aligned} \bar{T} &= T_t + (t_r + t_R) \cdot (64 + 2 + 8) + T_s \\ &= T_t + 74(t_r + t_R) + T_s, \end{aligned} \quad (13)$$

则 m 个量子分组完全通过该量子城域网路由器的时间为

$$T_M = \bar{T} \cdot m. \quad (14)$$

以最后一个量子分组计算, 所经过的量子城域网和量子广域网路由器数量的平均值为 n , 设 n 为奇数, 则经过了 $(n-1)/2$ 次路由, 每次路由的平均排队概率为 p , 平均排队时延为

$$W = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} \cdot p, \quad (15)$$

式中 λ 为每个量子路由器的分组到达率, $\rho = \lambda/\mu$ 表示每个路由器的繁忙程度, $\mu = 1/\bar{T}$ 表示每个路由器的服务速率. 则到达目的网络的城域网路由器, 需要的时间为

$$T_{MM} = T_M + (W + T_s) \cdot \frac{n-1}{2}, \quad (16)$$

则到达目的地址需要的总时间为

$$T = T_{MM} + \bar{T}. \quad (17)$$

若采用分层模式的量子分组传输, 当 m 个分组到达量子城域网路由器时, 量子城域网路由器读取量子分组, 聚合成量子簇数量为 S , 每个量子簇所需平均时间为

$$\begin{aligned} \bar{T}' &= T_t \cdot s_i + t_r \cdot (64 + 2 + 8) \cdot s_i \\ &\quad + t_R \cdot (64 + 2 + 8 \cdot s_i) + T_s \\ &= T_t \cdot s_i + 74t_r \cdot s_i \\ &\quad + t_R \cdot (66 + 8 \cdot s_i) + T_s. \end{aligned} \quad (18)$$

式中 s_i 满足 (12) 式. 则 S 个量子簇数量完全通过该量子城域网路由器的时间为

$$T_M = \bar{T}' \cdot S. \quad (19)$$

经过 $\frac{n-1}{2}$ 次路由, 每次路由的平均排队概率为 $p' = \frac{P}{S}$, 平均排队时延为

$$W' = \frac{\rho'}{\lambda'(1-\rho')} \cdot p', \quad (20)$$

式中 $\lambda' = \frac{\lambda}{S}$ 为每个量子路由器的分组到达率, $\rho' = \frac{\lambda'}{\mu'}$ 表示每个路由器的繁忙程度, $\mu' = \frac{1}{\bar{T}'}$ 表示每个路由器的服务速率. 则到达目的网络的量子城域网路由器需要的时间为

$$T'_{MM} = T'_M + (W' + T_s) \cdot \frac{n-1}{2}, \quad (21)$$

量子城域网路由器对量子簇分解时间为

$$\bar{T}'' = (64 + 2 + 8s_i) \cdot t_r, \quad (22)$$

则到达目的地址需要的总时间为

$$T' = T'_{MM} + \bar{T}'' + (T_t + 64 + 2 + 8 + T_s) \cdot s_i$$

$$= T'_{MM} + \bar{T}'' + (T_t + 74 + T_s) \cdot s_i. \quad (23)$$

图6表示量子分组总传输时间和路由选择时间 T_s 之间的关系, 图中所选的参数分别为 $n = 15$, $t_r = t_R = 0.1$ ns, $T_t = 10$ ns, $m = 10000$, $p = 0.1$, $\lambda = 0.3$, s_i 均为5. 从图6可以看出, 采用分层模式的量子分组传输比直接以单量子分组传输所需传输时间明显减少, 并且所减少的时间与量子路由器的路由选择性能有关. 量子路由选择时间越长, 则采用分层模式的量子分组传输方案有明显优势.

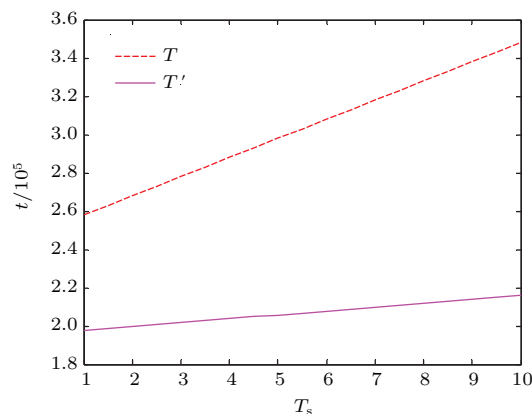


图6 (网刊彩色) 路由选择时间和量子分组总传输时间的关系

Fig. 6. (color online) The relationship between the time of routing and the total transmission time of quantum packets.

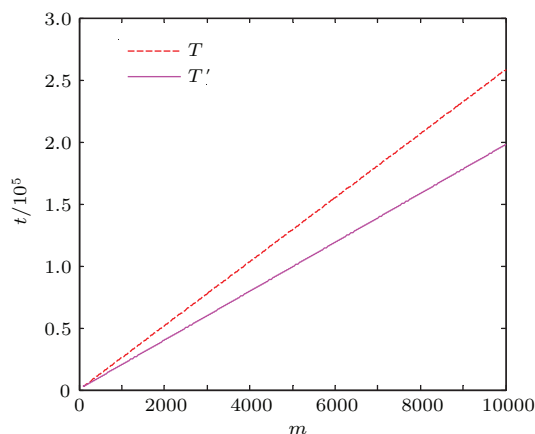


图7 (网刊彩色) 量子分组数和量子分组总传输时间的关系

Fig. 7. (color online) The relationship between the quantum number and the total transmission time.

图7表示量子分组总传输时间和量子分组数 m 之间的关系, 图中所选的参数分别为 $n = 15$, $t_r = t_R = 0.1$ ns, $T_t = 10$ ns, $T_s = 1$, $p = 0.1$, $\lambda = 0.3$, s_i 均为5. 从图7可以看出, 采用分层模式的量子分组传输比直接以单量子分组传输所需传

输时间明显减少, 并且所减少的时间与所传输的量子分组数有关. 量子分组数越多, 则采用分层模式的量子分组传输方案节约的时间越多.

6 结 论

本文主要从量子分组的传输方式出发, 结合经典通信的分层传输思路, 提出了一种基于分层的量子分组传输方案, 详细描述了该方案的量子分组处理步骤, 并对该方案所需的量子纠缠对数和总传输时间进行了分析计算. 结果表明, 传输一定量的量子分组所需的量子纠缠对数随着量子分组和量子簇所经过的路由器数量增加而增多; 当路由器个数一定时, 量子分组和量子簇传输过程中需要的量子纠缠对数取决于需要量子分组数, 采用分层模式的量子分组传输比直接以单量子分组传输所需传输时间减少. 最后对理论分析计算的结果做了 Matlab 仿真, 仿真结果表明, 图中所有的曲线变化趋势是符合理论逻辑的, 所以, 本文基于分层的量子分组传输方案是有效的, 可以应用在未来的量子通信网络中.

参考文献

- [1] Bennet C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [2] Ekert A 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 661
- [3] Bennett C H 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3121
- [4] Chan H C B, Leung V C M 2000 *Conference on Electrical and Computer Engineering* Halifax, Canada, Mar 7–10, 2000 p459
- [5] 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
- [6] Yurke B, Denker J S 1984 *Phys. Lett. A* **29** 1419
- [7] Cirac J I, Zoller P, Kimble H J, Mabuchi H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3221
- [8] Chip E 2002 *New J. Phys.* **4** 46
- [9] Long G L, Liu X S 2002 *Phys. Rev. A* **65** 032302
- [10] Deng F G, Long G L, Liu X S 2003 *Phys. Rev. A* **68** 042317
- [11] Elliott C <http://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0412/0412029.pdf> [2016-3-1]
- [12] Deng F G, Long G L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 052319
- [13] Dianati M, Alléaume R <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0610202v2/> [2016-3-1]
- [14] Wang J, Chen H Q, Zhang Q, Tang C J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 673 (in Chinese) [王剑, 陈皇卿, 张权, 唐朝京 2007 物理学报 **56** 673]
- [15] Wang T Y, Qin S J, Wen Q Y, Zhu F C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7452 (in Chinese) [王天银, 秦素娟, 温巧燕, 朱甫臣 2008 物理学报 **57** 7452]
- [16] Long G L, Wang C, Li Y S, Deng F G 2011 *Sci. China: Ser. G* **41** 332 (in Chinese) [龙桂鲁, 王川, 李岩松, 邓富国 2011 中国科学: 物理学 力学 天文学 **41** 332]
- [17] Long G L, Qin G Q 2014 *Phys. Eng.* **24** 3 (in Chinese) [龙桂鲁, 秦国卿 2014 物理与工程 2014 **24** 3]
- [18] Chen W, Han Z F, Zhang T, Wen H, Yin Z Q, Xu F X, Wu Q L, Liu Y, Zhang Y, Mo X F, Gui Y Z, Wei G, Guo G C 2009 *IEEE Photonic. Tech. L.* **21** 575
- [19] Xu F X, Chen W, Wang S 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 2277 (in Chinese) [许方星, 陈巍, 王双 2009 科学通报 **54** 2277]
- [20] Hu J Y, Yu B, Jing M Y, Xiao L T, Jia S T, Qin G Q, Long G L <http://arxiv.org/pdf/1503.00451v2.pdf> [2016-3-18]
- [21] Zeng B Y 2009 *M. S. Dissertation* (Nanchang: Nanchang University) (in Chinese) [曾宾阳 2009 硕士学位论文 (南昌: 南昌大学)]
- [22] Liu X H, Pei C X, Nie M 2014 *J. Jinlin. Univ. Technol. Ed.* **44** 1177 (in Chinese) [刘晓慧, 裴昌幸, 聂敏 2014 吉林大学学报 (工学版) **44** 1177]
- [23] Wang J M 2014 *M. S. 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)]
- [24] Chen P, Cai Y X, Cai X F, Shi L H, Yu X T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 040301 (in Chinese) [陈鹏, 蔡有勋, 蔡晓菲, 施丽慧, 余旭涛 2015 物理学报 **64** 040301]
- [25] Ma H Y, Qin G Q, Fan X K, Chu P C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160306 (in Chinese) [马鸿洋, 秦国卿, 范兴奎, 初鹏程 2015 物理学报 **64** 160306]
- [26] Xie X R 2008 *The Internet Network* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp17–364 (in Chinese) [谢希仁 2008 计算机网络 (北京: 电子工业出版社) 第 17—364 页]
- [27] Schaefer T, Barrett M D, Leibried D, Chiaverini J, Britton J, Itano W M, Jost J D, Langer C, Wineland D J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 040505

A scheme of quantum packet transmission and its performance analysis based on hierarchical*

Wang Lin-Fei^{1)†} Nie Min¹⁾ 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 10 March 2016; revised manuscript received 7 April 2016)

Abstract

By using quantum packet transmission technology in large scale quantum communication networks, the throughput of transmission node, network link utilization, and the anti-interference performance of communication can be effectively improved. However, the fast transmission of quantum packets is closely related to the performance of router. The bottleneck of the router performance will seriously affect the scalability of the network and the transmission efficiency of the link. In order to reduce the number of quantum packet queues in nodes of the quantum communication network and to reduce the transmission delay of quantum packets, firstly, according to the classical computer communication network structure, in our paper, we divide the quantum communication network into quantum local area network, quantum metropolitan area network and quantum wide area network. Secondly, the quantum packet format and the quantum cluster format compatible with the packet format in the computer network are determined. Then, a quantum information packet transmission scheme based on the hierarchy is proposed, to realize the end-to-end transmission of quantum information. In our scheme, the quantum packets are divided into quantum packet header information and quantum data information. Quantum dense coding mode is used to transmit the quantum packet header information, while the quantum data information uses quantum teleportation to transmit. First, the quantum packets are sent to the router of the quantum local area network at source address, then the quantum LAN router relay the packets to the quantum metropolitan area network router, the router here makes the quantum packets into quantum cluster according to destination address. Quantum clusters are transmitted in the quantum metropolitan area network and quantum wide area network, ending in the quantum metropolitan area network routing. After the quantum clusters are decomposed, they are sent to the destination address through the local area network router of each quantum packet.

We analyze the number of quantum entanglement pairs and the total transmission time in our scheme. The results show that the more the routers by the quantum packet and the quantum cluster are, the more the number of quantum entanglement pairs required by the transmission of a certain quantum packet is. When the number of routers is certain, the number of entanglement pairs required in the transmission process of quantum packet and quantum cluster depends on the number of quantum packets. Finally, the theoretical analysis and calculation are carried out by Matlab simulation, the results show that hierarchical quantum packet information transmission scheme can effectively reduce the transmission time of quantum packet information in the quantum communication network, and the reduced time

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 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

is related to the quantum router performance and the number of quantum packets to send: the more the number of quantum packets to send, the longer the length of packet processing time needs is and the more obvious the advantage of our scheme is. Therefore, the proposed scheme in this paper is suitable for the construction of large scale quantum communication networks.

Keywords: quantum communication, packet transmission, quantum teleportation

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Dv

DOI: [10.7498/aps.65.130302](https://doi.org/10.7498/aps.65.130302)