

基于最少中继节点约束的量子 VoIP 路由优化策略

聂敏 刘广腾 杨光 裴昌幸

Voice over quantum IP routing based on least relay node constrained optimization strategy

Nie Min Liu Guang-Teng Yang Guang Pei Chang-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 120302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.120302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.120302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于分层的量子分组传输方案及性能分析

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

物理学报.2016, 65(13): 130302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130302>

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>

基于最少中继节点约束的量子VoIP 路由优化策略*

聂敏¹⁾ 刘广腾^{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 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12月1日收到; 2016年3月23日收到修改稿)

量子信息的传输过程中, 由于拥塞、链路故障等原因, 导致数据分组在路由器排队, 产生时延、丢包. 为了保证量子VoIP系统的性能, 本文提出了基于最少中继节点约束的路由优化策略. 采用基于纠缠交换的中继技术, 通过优先选择最少中继节点的量子信道, 实现多用户量子VoIP通信. 理论分析和仿真结果表明, 当链路出现故障和拥塞时, 基于M/M/m型排队系统, 采用本策略, 当设定量子比特的误码率为0.2, 共用信道数目从4增加到8时, 量子网络的呼损率由0.25下降到0.024, 量子网络的最大吞吐量由64 kbps增加到132 kbps. 当设定共用信道数目为4, 控制量子比特的误码率从0.3到0.1时, 可使量子网络最大吞吐量从41 kbps增加到140 kbps. 由此可见, 本策略能够极大地提高量子VoIP网络的性能.

关键词: 量子通信, 纠缠交换, 最少中继节点, 量子VoIP

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Mn, 89.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.120302

1 引言

量子通信是面向未来的全新通信技术, 基于量子远程传态和纠缠交换的量子通信网络具有大传输容量和高安全性^[1]. 随着量子通信研究的不断深入, 量子通信网络也在快速发展. 1997年, 首次实现了基于量子远程传态的实验^[2]; 2003年, 基于纠缠交换的量子中继器试验成功^[3]. 2010年, 实现了16 km的长距离自由空间量子隐形传输^[4]; 2012年, 刷新了量子隐形传态的记录, 实现了自由空间内距离达到97 km的多光子量子隐形传态^[5]; 2013年, 通过光纤实现了距离超过300 km的纠缠粒子分发^[6]. 然而远距离量子通信的实现仍处于初级阶

段, 量子中继^[7-9]和量子路由^[10,11]是实现远距离量子通信的关键技术. 文献^[12]提出了一种基于纠缠态的量子中继通信系统, 该系统应用纠缠为基本资源, 纠缠为量子隐形传态和绝对安全的量子通信提供了保障. 文献^[13]提出了无线自组织量子通信网络概念并设计其路由协议, 实现了无线自组织量子通信网络中任意两节点间信息的传递. 文献^[14]提出了一种基于多阶量子隐形传态的量子路由方案, 实现了在量子移动终端之间没有共享纠缠对的情况下, 仍然可以完成量子态的无线传输. 文献^[15]提出了针对多用户量子信令网络中继模型, 表明量子信令远程传输成功率与噪声功率谱密度、传输距离和中继次数三个因素密切相关. 文献^[16]提出了量子信令中继模型, 解决了量子信令远程传

* 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(批准号: 2015KW-013)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liugt526@163.com

输损伤问题.

在此基础上, 本文通过量子通信过程中路由之间出现的链路故障或排队现象, 提出了基于最少中继节点的量子VoIP (voice over internet protocol) 路由策略, 该策略是基于纠缠交换的中继技术和路由算法的选择, 实现了多用户的量子通信时, 通过最低中继节点的路由选择量子信道, 降低了网络的呼损率提高了吞吐量.

2 量子VoIP网络

经典VoIP [17,18] 是以数据封包的形式, 在IP网络上进行数据实时传递的方式. VoIP最大的优势是能广泛地采用Internet和全球IP互联的环境, 提供比传统业务更多、更好的服务. VoIP可以在IP网络上便宜地传送语音、传真、视频、和数据等业务. 量子VoIP [19] 仿效传统的电路交换技术, 把语音信息打包成量子数据包, 通过使用QIP (quantum internet protocol) 路由网络, 可以实现国际网络电话服务.

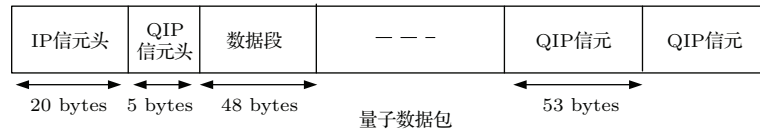


图1 QIP信元结构和量子数据包

Fig. 1. QIP cell structure and quantum packet.

2.2 量子VoIP网络的工作原理及工作流程

量子VoIP网络的工作原理如图2所示. 整个量子VoIP网络是由经典网络和量子网络组成. 设经典通信网络属于可信通信网, 量子网络存在安全隐患. 因此在进行语音通信时, 要对量子网络采用绝对安全的量子通信. 量子网络和经典网络之间增加一个交换机是为了把量子比特转换成经典的比特流 (或把经典的比特流转换成量子比特), 并可以使用现有的TCP/IP协议进行安全传输. 具体步骤如下 (以量子用户A和D语音通信为例).

第一步: 用户A通过使用量子交换机/量子计算机把语音信号通过调制变成QIP信元, 并且把QIP信元打包成量子数据包. 由上文可知, 一个量子数据包是由IP信元头和多个QIP信元组成. 量

2.1 量子VoIP的关键技术

量子VoIP网络的实现的关键技术是QIP路由协议. 与经典的路由协议类似, QIP路由协议也是根据路由表来存储和转发来自外部的数据包, 但是QIP路由性能要比普通的路由优越, 它不但可以支持普通的IP数据包的传输, 同样支持量子数据包的传输.

QIP的信元长度是固定不变的, 而量子数据包的长度不是惟一的. 如图1所示, QIP信元是由信元头和数据段组成. 如果多个QIP信元的IP信元头有相同的源地址和目的地址, 则认为它们属于同一量子数据流. 经典的IP信元头可以确保量子语音信号通过TCP/IP协议在互联网上传输, 而QIP信元头是量子数据信息的标志, 也是它们在QIP路由上传输的依据, 它不仅包含了量子数据包的源地址、目的地址和控制信息, 而且还可以让QIP路由识别为量子数据包, 以便在QIP路由上传输量子数据包.

子数据包途径的QIP路由, 对QIP路由表检查和更新, QIP路由进行识别量子数据包和呼叫的接纳控制判断呼叫是否可以建立, 若呼叫建立则更新QIP路由表并依据QIP信元头的 <源地址, 目的地址> 转发到下一个QIP路由器.

第二步: 当量子数据包传输到在量子网络和互联网 (internet) 之间时, 交换机可以把量子比特转换成经典比特, 通过TCP/IP协议和经典路由协议在互联网中传输.

第三步: 当语音信号离开经典网络, 交换机完成将经典比特转换成量子比特, 并打包成QIP路由可以识别的QIP信元. 最后通过QIP路由器的选择达到目的地用户D, 用户D通过量子交换机或量子计算机把QIP信元转换成语音信号, 完成量子语音业务.

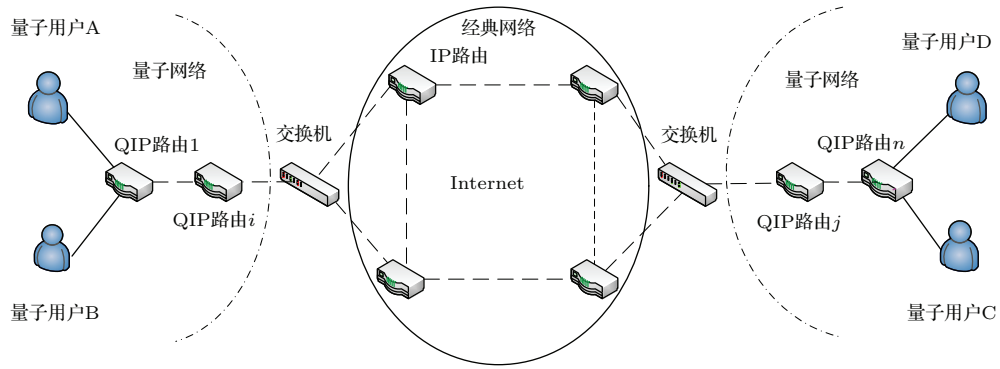


图2 量子 VoIP 网络工作原理

Fig. 2. The operating principle of quantum VoIP network.

2.3 量子 VoIP 的物理原理

在量子通信网中语音信号通过编码调制成对应的量子比特. 由于量子密集编码具有保密性强和高效的传输特性, 采用量子密集编码进行量子比特传输.

量子密集编码: 使用量子纠缠现象可以实现只传输一个量子位就像能传输两比特的经典信息.

假设 Alice 和 Bob 拥有一个最大纠缠态 $|\phi^+\rangle$ 中的量子位为^[20]

$$|\phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

利用操作算子集合 $\{I, X = \sigma_x, Y = \sigma_y, Z = \sigma_z\}$ 中的算子, Alice 可以产生 Bell 基中的任何一个纠缠态

$$\begin{aligned} I|\phi^+\rangle &= |\phi^+\rangle, & X|\phi^+\rangle &= |\phi^-\rangle, \\ Y|\phi^+\rangle &= |\phi^-\rangle, & Z|\phi^+\rangle &= |\phi^-\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

由于存在四种可能, Alice 对操作算子的选择代表两比特经典信息. 即

$$\begin{aligned} 00: |\phi^+\rangle &\rightarrow \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}, \\ 01: |\phi^+\rangle &\rightarrow \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}}, \\ 10: |\phi^+\rangle &\rightarrow \frac{|10\rangle + |01\rangle}{\sqrt{2}}, \\ 11: |\phi^+\rangle &\rightarrow \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Bob 首先取第一量子位为控制位, 第二量子位为靶位, 使用一个受控非门, 即

$$\begin{aligned} C_{\text{NOT}}|\phi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |10\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)|0\rangle, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{NOT}}|\Phi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |11\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)|1\rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

紧接着测量靶位, 可以把反对称态从对称态中区分开来. 再用 Hadmard 操作即可求出叠加态中的符号.

$$\begin{aligned} H\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)\right\} &= |0\rangle, \\ H\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)\right\} &= |1\rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

再测量第一量子位, 根据结果是 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 就可以确定叠加态的正或负.

2.4 量子 VoIP 物理实现的可能性分析

量子信息存储技术和方式是量子 VoIP 物理实现的关键. 2008 年潘建伟团队发现原子团内的随机运动带来的自旋波乱相构成了限制毫秒级量子存储的主要物理机理, 并通过延长自旋波波长的方式成功地提升存储寿命至 1 ms. 2012 年潘建伟团队最终成功实现了 3.2 ms 的量子存储寿命及 73% 的读出效率. 2015 年郭光灿院士团队成功实现确定性单光子的多模式固态量子存储, 实现 100 个时间模式的多模式量子存储, 模式数创造世界最高水平, 为量子中继和全固态量子网络的实现打下了坚实的基础. 由此可见, 量子 VoIP 的物理实现是可能的.

3 量子 VoIP 路由模型

在经典的通信中, 信令路由是从起源信令点到达消息目的地所经过各信令点的预先确定的信令

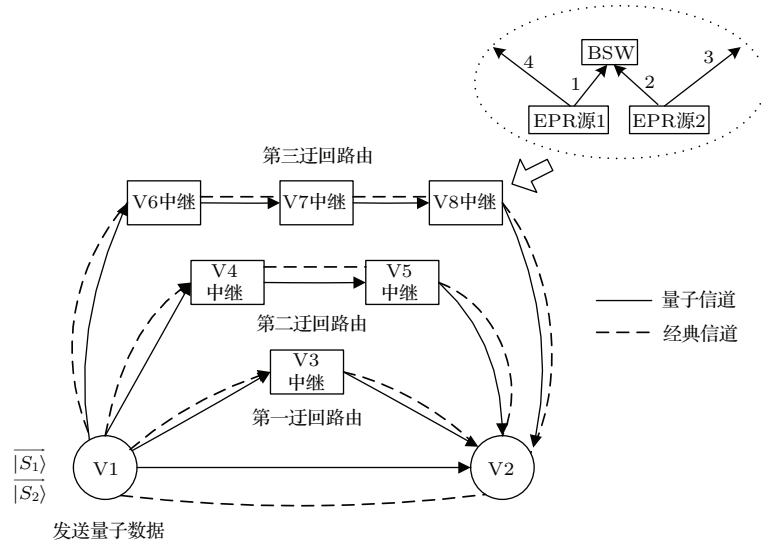


图3 量子VoIP路由模型

Fig. 3. Quantum VoIP routing model.

消息路径. 信令路由按其特征和使用方法分为正常路由和迂回路由两类. 对于正常路由, 如果链路未发生故障或链路业务量超出主路由的信道数, 超出部分就是溢出业务. 本文基于经典迂回路由, 结合量子信令的传输要求提出了量子VoIP路由模型, 如图3所示. 在该图中实线代表量子信道, 虚线代表经典信道.

4 量子VoIP路由算法

量子VoIP路由采用纠缠交换的中继原理, 建立可靠的量子远程传输信道, 实现量子态的远程传输. 如图4所示, 其工作原理如下.

1) 首先节点V1和节点V2进行量子通信, 量子信令路由的选择遵循“最短路径”和“负荷分担”的原则, 设量子用户的单位时间呼叫次数服从Poisson分布为 λ , 平均服务时间为 $1/S$, 则系统的平均用户数为^[21]

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{n=0}^{\infty} np_n = \sum_{n=0}^{\infty} n\rho^n(1-\rho) \\
 &= \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda}{S-\lambda}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

p_n 为系统的稳态概率; $\rho = \lambda/S$. 由(6)式可以看出当 ρ 趋于1时, 会使 U 趋于无穷大; 或者当 ρ 大于1时, 都会使系统来不及服务, 从而导致排队现象. 排队现象就会导致量子路由的业务溢出, 在这种情况下量子路由根据路由表首先选择中继节点数目最少的第一迂回路由.

2) 若第一迂回路由处于休假或者排队现象则可选择第二迂回路由, 当量子第二迂回路由出现排队或休假再选第三迂回路由, 以此类推.

3) 在量子迂回路由中, 若有同一等级的多个信令路由时, 多个路由之间应采用负荷分担的方式, 均匀地分担信令业务. 若其中一条信令路由的信令路由出现故障, 则将它分担的信令业务倒换分担到其他信令链路上. 若其中一条信令路由出现故障, 则它分担的信令业务倒换到采用符合分担的其他信令路由上.

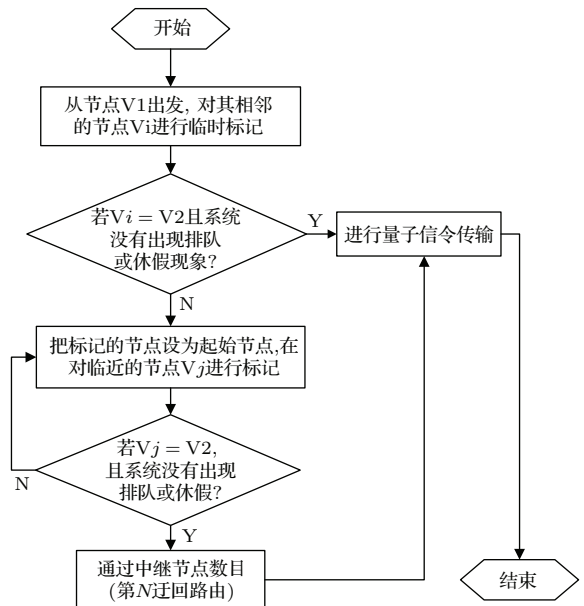


图4 量子VoIP路由信道的选择

Fig. 4. The channel choice of quantum VoIP routing.

5 量子 VoIP 路由的建立

本文是利用基于纠缠交换的中继技术. 量子中继器的核心思想在于: 相距 l 的两个节点之间的纠缠可通过两个距离都是 $l/2$ 的纠缠态通过纠缠得到. 而距离为 $l/2$ 的纠缠态又可以通过都是 $l/4$ 的纠缠态通过纠缠交换得到, 以此类推. 本文根据中继过程中中继的节点数量来优先选择第一迂回路由、第二迂回路由以及第 $N(N > 2)$ 迂回路由.

1) 当量子 VoIP 路由正常则采用最短路径, 节点 V1 制备 EPR 纠缠对 1 和 2, 并保留粒子 1, 把 2 直接发送给节点 V2, 建立量子信道.

2) 若量子 VoIP 路由出现故障, 或者链路出现排队现象, 则优先采用第一迂回路由. 首先节点 V1 制备 EPR 对 1 和 2, 并把 2 发送给节点 V3; 节点 V3 制备 EPR 对 3 和 4, 并对 2 和 3 进行 Bell 测量, 导致 1 和 4 发生纠缠, 然后把粒子 4 发送给 V2; 从而粒子 1 和 4 建立纠缠关系, 建立了量子信道. 其具体步骤如下.

设 V1 和 V3 有两对纠缠比特 [20],

$$|\Psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{12} + |10\rangle_{12}), \quad (7)$$

$$|\Psi\rangle_{34} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{34} + |10\rangle_{34}). \quad (8)$$

粒子 1 和 2 为一对纠缠比特, 3 和 4 为另一对纠缠比特, 现在使粒子 1 和 2 组成的纠缠比特 $|\Psi\rangle_{12}$ 与粒子 3 和 4 组成的纠缠比特 $|\Psi\rangle_{34}$ 构成一个复合系

统, 四个粒子组成的一个系统可表示为

$$|\psi\rangle = |\Psi\rangle_{12} \otimes |\Psi\rangle_{34}. \quad (9)$$

然后, 将粒子 2 和 3 投影到这两个粒子构成四个 Bell 基中的一个进行测量, 若选取的 Bell 基为

$$|\Psi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{23} + |10\rangle_{23}), \quad (10)$$

节点 V1 通过经典信道把要测量的 Bell 基通知节点 V2, 通过投影测量则会得到 [20]

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{14} &= \langle\Psi|_{23} [|\Psi\rangle_{12} \otimes |\Psi\rangle_{34}] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle_{14} + |01\rangle_{14}), \end{aligned} \quad (11)$$

这样粒子 1 和 4 就建立了纠缠信道 $|\Psi\rangle_{14}$, 量子信息就可以通过该信道进行正常通信.

3) 当第一迂回路由出现故障时, 则选择第二迂回路由, 以此类推. 当中间中继路由数为 $L(L \geq 3)$ 时, 如图 5 所示, 当选取的测量基为

$$|\Psi\rangle_{N-2,N-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{N-2N-1} + |10\rangle_{N-2N-1}), \quad (12)$$

则信道的建立为

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{1N} &= \langle\Psi|_{N-2N-1} [|\Psi\rangle_{1N-2} \otimes |\Psi\rangle_{N-1N}] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle_{1N} + |01\rangle_{1N}). \end{aligned} \quad (13)$$

由上式看出粒子 1 和 $N(N \geq 3)$ 建立了量子信道 $|\Psi\rangle_{1N}$.

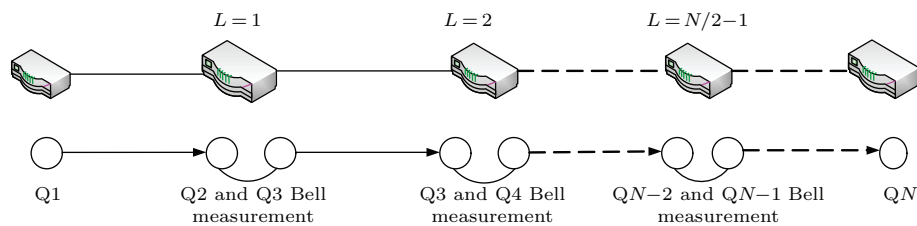


图 5 基于纠缠交换的量子 VoIP 路由

Fig. 5. Quantum VoIP routing based on entanglement exchange.

6 仿真分析

6.1 量子 VoIP 路由对链路呼损率的影响

若量子用户 Alice 和 Bob 进行量子通信时, 流入话务量 η 的大小取决于单位时间内平均发生的呼叫次数 γ 和每次呼叫占用信道的平均时间 $1/\chi$.

因此流入话务量 [22] 为

$$\eta = \frac{1}{\chi} \times \gamma, \quad (14)$$

η 为一个无量纲, 单位为“爱尔兰”(Erlang).

在信道共用的情况下, 量子通信网无法保证每个用户的所有呼叫都会成功, 因此会有少量的呼叫失败, 即发生呼损. 若整个量子网络单位时间发生

的总呼叫次数为 γ_{all} , 但是只有 $\gamma_0 (\gamma_0 \leq \gamma_{\text{all}})$ 次呼叫成功. 因此成功的话务量 η_0 为

$$\eta_0 = \gamma_0 \times \frac{1}{\chi}. \quad (15)$$

定义损失的话务量占流入的话务量的比率为呼损率 B , 即

$$B = \frac{\eta - \eta_0}{\eta} = \frac{(\gamma_{\text{all}} - \gamma_0)\chi}{\gamma_{\text{all}} \cdot \chi} = \frac{\gamma_{\text{all}} - \gamma_0}{\gamma_{\text{all}}}. \quad (16)$$

设该量子 VoIP 路由共有 M 个信道, 若系统中的容量为 M , 当量子用户进入系统时, M 个“服务员”全忙, 就会离开系统, 造成呼损. 由上式可以看出当呼叫次数一定时, 呼损率与呼叫成功的次数成反比, 然而呼叫成功的次数与多个信道是否繁忙相关, 因此呼损率也与信道个数相关. 因此我们定义当每个用户的呼叫都是相互独立、且每次呼叫的时间上都有相同分布时, 其呼损率可写为

$$B = \frac{\eta^M / M!}{\sum_{j=0}^M \eta^j / j!} = \frac{\eta^M}{M! \sum_{j=0}^M \eta^j / j!}. \quad (17)$$

6.1.1 量子 VoIP 路由的呼损率仿真

通过使用 matlab 对 (17) 式进行仿真, 在信道数目取 $M = 4, M = 6, M = 8$ 时的情况下, 呼损率 B 随着单位时间流入的话务量 η 变化的仿真结果如图 6 所示. 可见当信道数目一定时, 量子网络的呼损率 B 随着流入的话务量的增加而增加, 原因是由于信道数目一定时, 单位时间内系统处理数据的最大速率是一定的, 当流入的话务量不断增加会使系统无法即时处理到达的量子信息, 导致呼损率

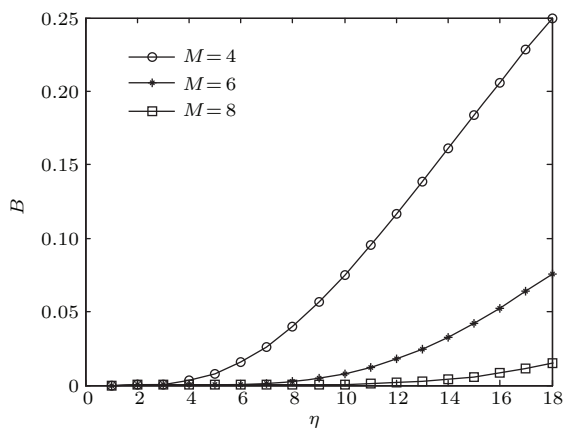


图 6 呼损率随流入话务量的变化关系

Fig. 6. Call loss rate along with the change of traffic flow in relationship.

增高. 但是当信道数目由 4 增加到 8 时, 可以看出同样的流入话务量信道数目越多呼损率越低. 当呼损率一定时信道数目由 4 增加到 8, 流入的话务量却减少. 因此对于多用户的量子 VoIP 通信, 应根据呼损率、信道数目流入的话务量综合考虑.

6.2 量子 VoIP 路由系统的吞吐量影响

对于该量子路由系统, 制备一个 EPR 纠缠对所产生的平均时间即为 t_a ; 设各中继之间的距离相等, 则传送的纠缠光子的平均时间为 t_b ; 对两粒子进行 Bell 基测量所需的平均时间为 t_c ; 根据测量结果进行么正变换恢复量子比特的平均时间为 t_d . 若每个信道都能容纳 k 个单位的量子信息, 则单个信道每传输 k 个单位量子信息所需的总时间 t' 为

$$t' = (t_a + t_b + t_c + t_d)k. \quad (18)$$

对于有 M 条信道共用的量子 VoIP 路由系统, 平均每个信道的所需制备 EPR 纠缠对所需的总时间为 $t'_a = \frac{(M+1)}{2}t_a$; 平均每个信道传送纠缠光子的总时间为 $t'_b = \frac{(M+1)}{2}t_b$; 平均每个信道进行 Bell 基测量所需的总时间为 $t'_c = \frac{(M-1)}{2}t_c$; 平均每个信道根据测量结果进行么正变换恢复量子比特的总时间为 $t'_d = \frac{(M-1)}{2}t_d$. 因此平均每个信道单位时间内发送 k 个单位的量子比特则所需总时间 t 为

$$t = (t'_a + t'_b + t'_c + t'_d)k. \quad (19)$$

当量子信令通过路由传输的过程中, 若系统的传输量子比特的误码率为 p_r , 则对于一个量子用户成功传输量子信息的最大速率 ν' 为

$$\nu' = \frac{k(1 - p_r)^k}{t}. \quad (20)$$

当使用 M 个信道并用时的最大速率 ν , 即吞吐量为

$$\nu = M \frac{k(1 - p_r)^k}{t}. \quad (21)$$

6.2.1 量子 VoIP 路由的吞吐量的仿真

通过使用 matlab 对 (21) 式进行仿真, 仿真参数分别设置为: $t'_a = 1 \text{ ns}$, $t'_b = 1 \text{ ms}$, $t'_c = 2 \text{ ns}$, $t'_d = 3 \text{ ns}$, $P_r = 0.2$. 在信道数目 $M = 4, M = 6, M = 8$ 的情况下, 吞吐量随着单位时间发送的量子比特长度变化的仿真结果如图 7 所示. 结果表明, 当信道数目一定时, 吞吐量随着单位时间发送量子比特长度的增加呈现先增加后下降的趋势. 这

是因为起初单位时间内发送的量子比特长度还没有达到系统处理量子比特的最大速率, 随着量子比特长度的不断增加, 吞吐量先是随着增加, 当达到系统处理量子信息的最大速率时, 系统的吞吐量达到最大值, 之后会随着量子比特长度的增加而下降. 当发送的量子比特长度一定时, 吞吐量会随着信道数目的增加而变大, 但是当吞吐量一定时, 信道数目越大所发送的量子比特长度却越小. 因此在量子语音通信时, 应综合考虑系统的吞吐量、单位时间发送的量子比特长度和并用信道的数目等因素.

在图8中, 通过取量子比特误码率分别为 $P_r = 0.1$, $P_r = 0.2$, $P_r = 0.3$ 和信道共用数目为 $M = 4$. 可以看出提高误码率可以提高系统的吞吐量, 但是随着单位时间发送的量子比特的增长, 吞吐量也是呈现先增加后下降的结果.

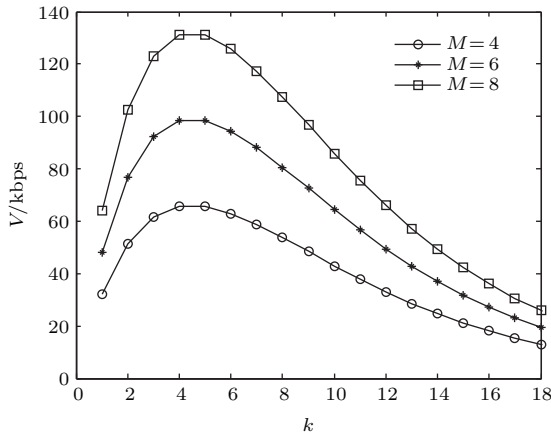


图7 不同信道下吞吐量随着量子比特长度的变化关系
Fig. 7. Throughput as quantum bit length change under different channel relationships.

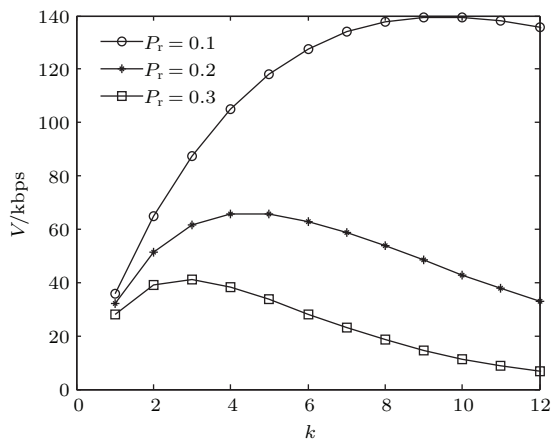


图8 不同误码率下吞吐量随量子比特长度的变化关系
Fig. 8. Throughput under different error rate along with the change of the length of the quantum bit.

7 结 论

针对多用户量子 VoIP 通信存在的链路故障和拥塞导致的排队问题, 本文提出了基于最少中继节点的量子 VoIP 路由策略. 当链路出现故障或拥塞, 通过量子 VoIP 路由算法, 优先选择具有最少中继节点的路由, 然后提出了基于纠缠交换的中继技术建立量子信道, 最后通过仿真分析了影响系统呼损率和吞吐量的主要因素. 通过合理地控制流入话务量并增加共用信道的数目, 可降低系统的呼损率, 通过减少发送量子比特的误码率和控制发送量子比特的长度, 能有效地增加系统的吞吐量. 因此, 基于最少中继节点约束的量子 VoIP 路由策略, 为量子网络有序、健康地发展提供了重要参考.

参考文献

- [1] Nielsen M A, Chuang I L 2000 *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge University Press) p3
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Zhao Z, Yang T, Chen Y A, Zhang A N, Zkowski M, Pan J W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 180401
- [4] 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. Photon.* **4** 339
- [5] Yin J, Ren J G, Lu H, Cao Y, Yong H L, Wu Y P, Liu C, Liao S K, Zhou F, Jiang Y, Cai X D, Xu P, Pan G S, Jia J J, Huang Y M, Yin H, Wang J Y, Chen Y A, Peng C Z, Pan J W 2012 *Nature* **488** 185
- [6] Inagaki T, Matsuda N, Tadanaga O, Asobe M, Takesue H 2013 *Opt. Express* **21** 23241
- [7] Chou C W, Laurat J, Deng H, Choi K S, de Riedmatten H, Felinto D, Kimble H J 2007 *Science* **316** 1316
- [8] Wang T J, Song S Y, Long G L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **85** 062311
- [9] Daniel G, Thomas J, Sarah C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **109** 070503
- [10] Pemberton-Ross P J, Alastair P J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 34
- [11] Zhong W G, Xing K F, Shu M W 2015 *Tien Tzu Hsueh Pao Acta Electron. Sin.* **43** 171
- [12] 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]
- [13] Pei C X, Yan Y, Liu D, Han B S, Zhao N 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 2422 (in Chinese) [裴昌幸, 阎毅, 刘丹, 韩宝彬, 赵楠 2008 光子学报 **37** 2422]
- [14] Liu X H, Nie M, Pei C X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 200304 (in Chinese) [刘晓慧, 聂敏, 裴昌幸 2013 物理学报 **62** 200304]

- [15] Lian T, Nie M 2012 *Acta Photon. Sin.* **41** 1251 (in Chinese) [连涛, 聂敏 2012 光子学报 **41** 1251]
- [16] 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]
- [17] Sengar H, Dantu R, Wiljsekera D 2006 *IEEE Workshop on Voip Management & Security* **10** 1
- [18] Goode B 2002 *Proc. IEEE* **90** 1495
- [19] Chan H C B, Leung V C M 2000 *Conference on Electrical and Computer Engineering Halifax, Canada*, Mar. 7–10, 2000 p459
- [20] Yin H, Ma H X 2006 *Introduction to Quantum Communication in Military* (Beijing: Military Science Press) p269 (in Chinese) [尹浩, 马怀新 2006 军事量子通信概论 (北京: 军事科学出版社) 第 269 页]
- [21] Li J D, Sheng M 2004 *Communication Networks Fundamentals* (Beijing: Higher Education Press) pp88–91 (in Chinese) [李建东, 盛敏 2004 通信网络基础 (北京: 高等教育出版社) 第 88—91 页]
- [22] Liu W C 2011 *Mobile Communication* (Beijing: Peking University Press) pp112–114 (in Chinese) [刘维超 2011 移动通信 (北京: 北京大学出版社) 第 112—114 页]

Voice over quantum IP routing based on least relay node constrained optimization strategy*

Nie Min¹⁾ Liu Guang-Teng^{1)†} Yang Guang¹⁾²⁾ 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 1 December 2015; revised manuscript received 23 March 2016)

Abstract

Quantum communication is the interdisciplinary science of quantum mechanics and telecommunication theory. It has advantages of perfect information security and high efficiency in transmission. In recent years, the theoretical and experimental results show that quantum communication systems have the superiority over the traditional communication systems. Quantum communication systems are hopeful for solving the information security problems that everyone is facing today, therefore, they possess broad application prospects and are forming a research hotspot of the telecommunications field currently. On the other hand, Voice over Internet Protocol (VoIP) is the method to transmit the digitized packet voice in Internet around the world. The advantages of VoIP are that it can carry voice, data, video, telephone conference, electronic commerce, and electronic mail economically. VoIP can realize the information storage and retransmission easily and flexibly. However, VoIP also encounters the problem of information security. We are trying to combine the quantum communications network and the VoIP system together and build a brand new network named quantum VoIP network which combines the advantages of both quantum communications and VoIP. The data packets may be delayed and lost in a queue up with a router due to the congestion and link failure during the transmission of quantum information. In order to ensure the performance of quantum VoIP system, the routing optimization strategies are proposed in the paper. The relay technology based on entanglement swapping is adopted. The multiuse quantum communications are realized by giving priority to the quantum channels with the least relay nodes. Theoretical analysis and simulation results show that when the data transmission links are fail to work properly and routers are in congestion, adopting the routing optimization strategies in M/M/m queuing system with the bit error rate (BER) of quantum bit setting to be 0.2 and the number of common channels increasing from 4 to 8, the percentage of call failure in quantum communication network decreases from 0.25 to 0.024, and the maximum throughput of quantum networks increases from 64 kbps to 132 kbps. In comparison, when the number of common channels is set to be 4 and the BER of the quantum bit is from 0.3 to 0.1, the maximum throughput of quantum networks increases from 41 kbps to 140 kbps. Thus it can be concluded that the routing optimization strategies proposed in this paper can improve the performance of quantum VoIP system significantly.

Keywords: quantum communication, entanglement swapping, least relay node, quantum VoIP

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Mn, 89.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.120302

* 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: liugt526@163.com