

## 基于两端纠缠交换的量子卫星网络路由协议仿真

聂敏<sup>1</sup>, 郭建伟<sup>1\*</sup>, 卫容宇<sup>1</sup>, 杨光<sup>1,2</sup>, 张美玲<sup>1</sup>, 孙爱晶<sup>1</sup>, 裴昌幸<sup>3</sup><sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;<sup>2</sup>西北工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710072;<sup>3</sup>西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 为解决全球范围内任意两个用户进行量子通信的路径选择问题, 根据蒲公英球形量子卫星网络的结构特性, 提出了一种两端纠缠交换的量子路由方案。该方案同时从源节点和目的节点向中间节点建立纠缠, 并通过无线信道传送 Bell 测量结果, 从而完成量子态信息从源节点到目的节点的传输过程。仿真结果表明: 随着交换卫星数目的增多, 两端纠缠交换路由方案可以有效节约量子态信息的传输时间; 随着交换卫星节点的增加, 采用两端纠缠交换路由方案的量子信道建立速率与逐跳纠缠交换方案的量子信道建立速率相比具有显著优势, 其路由传输开销小于逐跳纠缠交换方案。由此可见, 两端纠缠交换量子路由方案具有信息传输时间短、量子信道建立速率高、无线传输开销小等优势。

**关键词** 光通信; 全球量子卫星网络; 两端纠缠交换; 路由发现; 区域查询

中图分类号 TN927+.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0306002

## Simulation of Quantum Satellite Network Routing Protocol Based on Two-End Entanglement Exchange

Nie Min<sup>1</sup>, Guo Jianwei<sup>1\*</sup>, Wei Rongyu<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1,2</sup>, Zhang Meiling<sup>1</sup>, Sun Aijing<sup>1</sup>,  
Pei Changxing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

<sup>2</sup>School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** To address the path selection for quantum communication between any two users around the world, according to the structural characteristics of the dandelion spherical quantum satellite network, a quantum routing scheme with two-end entanglement exchange is proposed. In this scheme, entanglement is established from the source node and the destination node to the intermediate node, and the Bell measurement results are transmitted through the wireless channel, so as to complete the transmission process of quantum state information from the source node to the destination node. Simulation results show that: with the increase of the number of switching satellites, the two-end entanglement exchange routing scheme can effectively reduce the transmission time of quantum information; with the increase of the number of switching satellite nodes, the quantum channel establishment rate of the two-end entanglement exchange routing scheme is significantly superior to that of the hop

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-06-19; 录用日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61971348, 61201194)、陕西省国际科技合作与交流计划(2015KW-013)、陕西省教育厅科研计划(16JK1711)

\*E-mail: 15539979017@163.com

by hop entanglement exchange scheme, and its routing transmission cost is less than that of the hop by hop entanglement exchange scheme. It can be seen that the quantum routing scheme of the two-end entanglement exchange has the advantages of short information transmission time, high quantum channel establishment rate, and small wireless transmission overhead.

**Key words** optical communications; global quantum satellite network; two-end entanglement exchange; route discovery; area query

**OCIS codes** 060.5565; 060.4251; 060.4510

## 1 引言

量子通信是指利用量子特性进行信息传输的一种通信方式,2002年,德国研究人员成功完成了大气中 23.4 km 量子态信息传输实验<sup>[1]</sup>。2012年,奥地利科学院和维也纳大学的科学家实现了 143 km 的量子态信息的传输实验<sup>[2]</sup>。2016年,中国科学院大学的潘建伟小组成功实现了“墨子号”量子试验卫星的发射<sup>[3]</sup>。2017年,通过“墨子号”量子卫星,我国科学家首次实现了洲际量子保密通信。这些研究表明,借助量子卫星作为中转平台可以在地球的任意两点之间建立量子信道,这是构建全球量子通信网络的最佳方案<sup>[4]</sup>。

上述的研究使得全球量子卫星通信网的构建方案成为可能。在此基础上,许多学者已经对影响量子卫星通信的因素和量子路由策略进行了研究。2007年,周南润等<sup>[5]</sup>提出了基于纠缠的数据链路层量子通信协议,有效地提高了数据链路的最大吞吐量。2011年,周小清等<sup>[6]</sup>针对量子隐形传态网络提出了一种互联方式和路由策略。2012年,余旭涛等<sup>[7]</sup>提出了基于量子隐形传态的无线自组织量子通信网络路由协议。2013年,张琳等<sup>[8]</sup>针对有噪声量子信道的生存函数进行了研究分析。2013年,刘晓慧等<sup>[9]</sup>提出了量子无线广域网的构建方案和相关路由策略。2014年,聂敏等<sup>[10]</sup>研究了中尺度沙尘暴对量子卫星通信性能的影响。2015年,任杰等<sup>[11]</sup>针对 PM<sub>2.5</sub> 对量子卫星通信性能的影响进行了相关仿真分析。2015年,杨光等<sup>[12]</sup>针对噪声量子纠缠信道提出了多跳最佳中继协议。2016年,聂敏等<sup>[13]</sup>提出了基于最少中继节点约束的量子 VoIP (Voice over Internet Protocol) 路由优化策略。2017年,聂敏等<sup>[14]</sup>分析了中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信的影响。2018年,张红亮<sup>[15]</sup>提出了基于 SDN (Software Defined Network) 的量子保密通信网络设计和路由优化。2019年,聂敏等<sup>[16]</sup>基于袋鼠的纠缠跳跃模型提出

了量子状态的自适应跳变通信策略<sup>[16]</sup>。2019年,何业锋等<sup>[17]</sup>提出了指示单光子源和量子存储的量子密钥分配方案。2019年,Vasylyev等<sup>[18]</sup>提出了大气状态下量子卫星的路由联系。2020年,刘涛等<sup>[19]</sup>分析了不同天气条件对量子通信系统的影响。2020年,刘邦宇等<sup>[20]</sup>分析了煤烟凝聚粒子对量子卫星通信性能的影响。2020年,张秀再等<sup>[21]</sup>分析了雾对量子通信性能的影响。

本文在上述研究的基础上提出基于两端逼近纠缠交换的量子卫星路由方案,与逐跳纠缠交换的量子路由方案相比,本文方案在信息传输时间和路由开销上具有明显的优势,其量子信道的建立速率快于逐跳纠缠交换方案,该方案有利于实现全球量子态信息传输,可以为下一代移动通信系统的健康发展提供理论基础。

## 2 基于两端纠缠交换的量子路由方案

### 2.1 两端逼近纠缠交换原理

本文中的量子路由方案借助中间节点,分别从发送端 Alice 和接收端 Bob 开始向中间节点 Jane 进行纠缠交换。采用该方法进行量子态信息的传输,可以有效减小信息的传输时延。具体的交换示意图如图 1 所示。

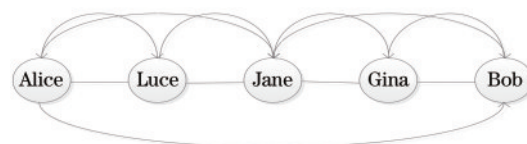


图 1 两端逼近纠缠交换原理图

Fig. 1 Approaching entanglement exchange principle at both ends

两端纠缠交换的流程如图 2 所示。

### 2.2 两端纠缠交换量子态信息传输过程

假设 Alice 为源节点, Bob 为目标节点, Luce, Jane 和 Gina 为交换节点,且已知 Jane 为传输路径上

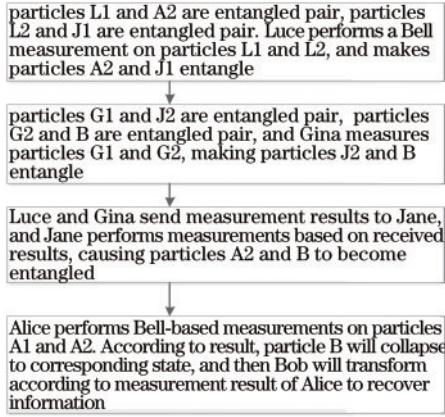


图 2 两端纠缠交换传输流程

Fig. 2 Entanglement exchange transmission process at both ends

的中间交换节点。若 Alice 要传送量子态信息  $|I\rangle$  给 Bob, Alice 的第二个粒子 A2 和 Luce 的第一个粒子 L1 为纠缠对, Luce 的第二个粒子 L2 和 Jane 的第一个粒子 J1 为纠缠对, Jane 的第二个粒子 J2 和 Gina 的第一个粒子 G1 为纠缠对, Gina 的第二个粒子 G2 和 Bob 的粒子 B 为纠缠对。两端纠缠交换的量子逻辑线路图如图 3 所示。

假设 Luce 的粒子 L1 和 Alice 的粒子 A2 的纠缠态为

$$|\psi^+\rangle_{A2L1} = (|0\rangle_{A2}|0\rangle_{L1} + |1\rangle_{A2}|1\rangle_{L1}), \quad (1)$$

式中:  $|0\rangle_{A2}$  表示粒子 A2 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|0\rangle_{L1}$  表示粒子 L1 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|1\rangle_{A2}$  表示粒子 A2 处于状态  $|1\rangle$ ;  $|1\rangle_{L1}$

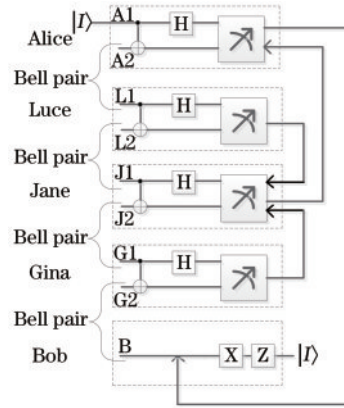


图 3 两端逼近交换逻辑线路图

Fig. 3 Approximation switching logic circuit diagram at both ends

表示粒子 L1 处于状态  $|1\rangle$ 。

Luce 的粒子 L2 和 Jane 的粒子 J1 的纠缠态为

$$|\psi^+\rangle_{L2J1} = (|0\rangle_{L2}|0\rangle_{J1} + |1\rangle_{L2}|1\rangle_{J1}), \quad (2)$$

式中:  $|0\rangle_{L2}$  表示粒子 L2 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|0\rangle_{J1}$  表示粒子 J1 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|1\rangle_{L2}$  表示粒子 L2 处于状态  $|1\rangle$ ;  $|1\rangle_{J1}$  表示粒子 J1 处于状态  $|1\rangle$ 。

四粒子的总状态为

$$|\psi\rangle_{A2L1L2J1} = \frac{1}{2} (|0\rangle_{A2}|0\rangle_{L1} + |1\rangle_{A2}|1\rangle_{L1}) \otimes (|0\rangle_{L2}|0\rangle_{J1} + |1\rangle_{L2}|1\rangle_{J1}). \quad (3)$$

Luce 的两个粒子 L1 和 L2 经过量子 CNOT 门和 Hadardard 门之后, 四个粒子总状态<sup>[22]</sup>为

$$|\psi\rangle_{A2L1L2J1} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [ |0\rangle_{L1}|0\rangle_{L2} (|0\rangle_{A2}|0\rangle_{J1} + |1\rangle_{A2}|1\rangle_{J1}) + |0\rangle_{L1}|1\rangle_{L2} (|0\rangle_{A2}|1\rangle_{J1} + |1\rangle_{A2}|0\rangle_{J1}) + |1\rangle_{L1}|0\rangle_{L2} (|0\rangle_{A2}|0\rangle_{J1} - |1\rangle_{A2}|1\rangle_{J1}) + |1\rangle_{L1}|1\rangle_{L2} (|0\rangle_{A2}|1\rangle_{J1} - |1\rangle_{A2}|0\rangle_{J1}) ]. \quad (4)$$

当 Luce 对粒子 L1 和 L2 进行测量, 且测量结果为  $|0\rangle_{L1}|0\rangle_{L2}$  时, Alice 的粒子 A2 和 Jane 的粒子 J1 处于纠缠态, 则有

$$|\psi^+\rangle_{A2J1} = |0\rangle_{A2}|0\rangle_{J1} + |1\rangle_{A2}|1\rangle_{J1}. \quad (5)$$

这样 A2 和 J1 就实现了纠缠, 对 Gina 的两个粒子进行同样的操作, 使 Jane 的粒子 J2 和 Bob 的粒子 B 之间形成纠缠, 四粒子结果为

$$|\psi\rangle_{J2G1G2B} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [ |0\rangle_{G1}|0\rangle_{G2} (|0\rangle_{J2}|0\rangle_B + |1\rangle_{J2}|1\rangle_B) + |0\rangle_{G1}|1\rangle_{G2} (|0\rangle_{J2}|1\rangle_B + |1\rangle_{J2}|0\rangle_B) + |1\rangle_{G1}|0\rangle_{G2} (|0\rangle_{J2}|0\rangle_B - |1\rangle_{J2}|1\rangle_B) + |1\rangle_{G1}|1\rangle_{G2} (|0\rangle_{J2}|1\rangle_B - |1\rangle_{J2}|0\rangle_B) ], \quad (6)$$

式中:  $|0\rangle_{G1}$  表示粒子 G1 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|0\rangle_{G2}$  表示粒子 G2 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|0\rangle_{J2}$  表示粒子 J2 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|0\rangle_B$

表示粒子 B 处于状态  $|0\rangle$ ;  $|1\rangle_{J2}$  表示粒子 J2 处于状态  $|1\rangle$ ;  $|1\rangle_B$  表示粒子 B 处于状态  $|1\rangle$ ;  $|1\rangle_{G2}$  表示粒子 G2

处于状态 $|1\rangle;|1\rangle_{J_2}$ 表示粒子 J2 处于状态 $|1\rangle;|1\rangle_{G_1}$ 表示粒子 G1 处于状态 $|1\rangle$ 。

将粒子 A2 和 J1 的测量结果以及 J2 和 B 的测量结

果告知 Jane, Jane 根据收到的 Luce 和 Gina 测量结果进行相对应的测量, 以粒子 A2 和 J1 处于纠缠态 $|\psi^+\rangle_{A_2J_1}$ 和粒子 J2 和 B 处于纠缠态 $|\psi^+\rangle_{J_2B}$  为例, 可以得到

$$|\psi\rangle_{A_2J_1J_2B} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[ |0\rangle_{J_1}|0\rangle_{J_2} \left( |0\rangle_{A_2}|0\rangle_B + |1\rangle_{A_2}|1\rangle_B \right) + |0\rangle_{J_1}|1\rangle_{J_2} \left( |0\rangle_{A_2}|1\rangle_B + |1\rangle_{A_2}|0\rangle_B \right) + |1\rangle_{J_1}|0\rangle_{J_2} \left( |0\rangle_{A_2}|0\rangle_B - |1\rangle_{A_2}|1\rangle_B \right) + |1\rangle_{J_1}|1\rangle_{J_2} \left( |0\rangle_{A_2}|1\rangle_B - |1\rangle_{A_2}|0\rangle_B \right) \right] \quad (7)$$

上述操作使得粒子 A2 和 B 之间形成了纠缠, Jane 将测量到的粒子 A2 和 B 的结果告知 Alice, 则 A2 和 B 经过纠缠交换后所处的量子态为

$$|\psi^+\rangle_{A_2B} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |0\rangle_{A_2}|1\rangle_B - |1\rangle_{A_2}|0\rangle_B \right) \quad (8)$$

Alice 收到 A2 和 B 的纠缠态信息后, Alice 开始向 Bob 传送量子态信息 $|I\rangle$ , 即

$$|I\rangle = |0\rangle + |1\rangle \quad (9)$$

然后进行量子态信息 $|I\rangle$ 的传送, 三粒子的总状态为

$$|\psi\rangle_{IA_2B} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |0\rangle_I|0\rangle_{A_2}|1\rangle_B - |0\rangle_I|1\rangle_{A_2}|0\rangle_B \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |1\rangle_I|0\rangle_{A_2}|1\rangle_B - |1\rangle_I|1\rangle_{A_2}|0\rangle_B \right) \quad (10)$$

式中 $|0\rangle_I$ 表示粒子 I 的基态 $|0\rangle;|1\rangle_I$ 表示粒子 I 的基态 $|1\rangle$ 。

(10)式可进一步表示为

$$|\psi\rangle_{IA_2B} = \left[ \left( |0\rangle_I|0\rangle_{A_2} + |1\rangle_I|1\rangle_{A_2} \right) \left( |1\rangle - |0\rangle \right)_B + \left( |0\rangle_I|0\rangle_{A_2} - |1\rangle_I|1\rangle_{A_2} \right) \left( |1\rangle + |0\rangle \right)_B + \left( |0\rangle_I|1\rangle_{A_2} + |1\rangle_I|0\rangle_{A_2} \right) \left( -|1\rangle + |0\rangle \right)_B + \left( |0\rangle_I|1\rangle_{A_2} - |1\rangle_I|0\rangle_{A_2} \right) \left( -|1\rangle - |0\rangle \right)_B \right] \quad (11)$$

(11)式表明 Alice 对粒子 I 和 A2 进行了 Bell 基测量, 根据粒子 I 和 A2 的 Bell 测量结果, 粒子 B 将坍缩到对应态, Alice 将粒子 I 和 A2 的 Bell 态的测量结果告知 Bob, 然后 Bob 根据测量的结果, 对粒子 B 进行相对应的么正变换, 就可以得到 A1 处所传递的量子态信息:

$$|B\rangle = |0\rangle + |1\rangle \quad (12)$$

### 2.3 量子路由仿真分析

在上述的量子路由方案中, 假设各节点之间进行 Bell 基测量的时间为  $T'$ , 节点间无线通信的传输时延为  $T''$ 。假设源节点到目的节点之间需要进行交换的节点数为  $n$ , 采用逐跳纠缠交换法进行量子态信息的传输<sup>[23]</sup>, 完成量子态信息传输所需要的时间为  $T_1$ , 采用两端纠缠交换法进行量子态信息的传输所需要的时间为  $T_2$ 。则  $T_1$  和  $T_2$  可分别表示为

$$T_1 = (n - 1)T' + (2n - 3)T'' \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{n}{2}T' + (n - 2)T'' \quad (14)$$

由图 4 可知, 通信链路中卫星节点个数的增加会导致传输时延的增加; 与逐跳纠缠交换方案相比, 两端逼近纠缠交换方式在传输时延方面更具优势; 在中间转发节点数为 11 的时候, 两端逼近纠缠交换方案比逐跳纠缠交换方案的平均时延减少了 50%,

而且随着中间转发卫星节点数目的增加, 两种交换方式之间的时延差异将会越来越大, 两端逼近纠缠交换方案在信息传输过程中会拥有更明显的优势。

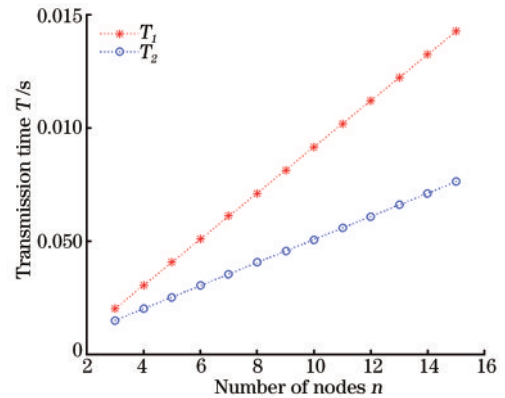


图 4 量子态信息传输时间和节点数的关系

Fig. 4 Relationship between transmission time of quantum information and number of nodes

## 3 蒲公英球形结构全球卫星网络量子路由策略

### 3.1 蒲公英球形结构量子卫星网络

利用蒲公英球形结构部署低轨道量子卫星通

信网络时,可以在全球形成三重有效覆盖,以保证全球范围内任意两个用户之间都能进行安全保密通信。该量子卫星网络中有 10 个轨道平面,量子卫星的轨道高度为 500 km,每个轨道上均匀分布 14 颗量子卫星,轨道平面倾角为 86°,这种卫星部署方法可以实现良好的通信服务性能。量子卫星网络架构如图 5 所示,将该网络抽象成如图 6 所示的一个图  $G(U, V)^{[24]}$ ,其中  $U$  为节点的集合,节点数为  $P' \times S'$ ,其中,  $P'$  为星座内轨道平面的数目,  $S'$  为每个轨道平面上卫星的个数;  $V$  为边的集合。将卫星的位置记为二元组  $(P, S)$ ,其中  $P=1, 2, \dots, 10$  为轨道平面的编号,  $S=1, 2, \dots, N(N=14, N$  为单轨道内卫星数目的最大值)为每个轨道内卫星的编号。然后基于该量子卫星网络结构研究两端逼近纠缠交换量子路由方案。

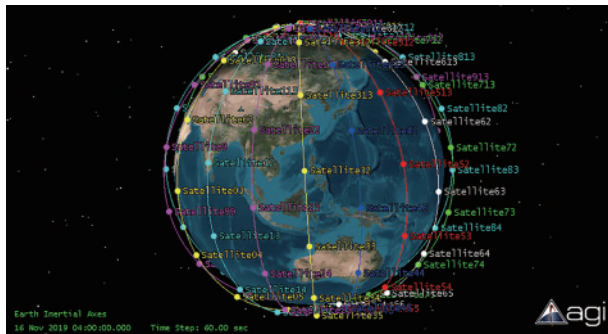


图 5 蒲公英球形结构量子卫星网络

Fig. 5 Quantum satellite network with dandelion spherical structure

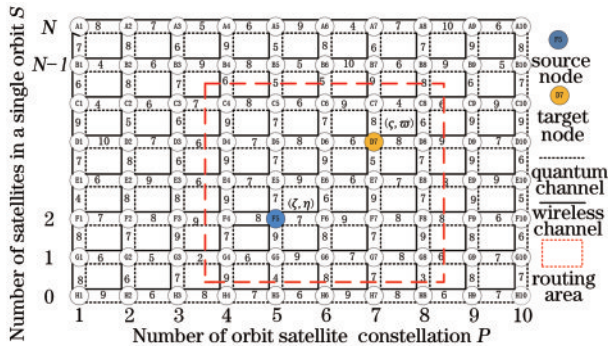


图 6 卫星网络虚拟坐标图

Fig. 6 Virtual coordinate map of satellite network

### 3.2 蒲公英球形结构量子卫星网络路由度量

路由度量是选择源节点与目的节点之间通信路径的标准<sup>[25]</sup>,本文中路由协议采用的度量规则为:1)最小纠缠粒子对数的最大值;2)最小跳数。

将最小纠缠粒子对数的最大值作为第一优先级,则有

$$J = \min \{N_{\text{Node}, j}\}, 1 \leq j \leq n - 1, \quad (15)$$

$$K = \max \{L_{\text{Line}, l}\}, 1 \leq l \leq m, \quad (16)$$

式中:  $J$  为该条通信路径上的最小纠缠粒子对数目;  $N_{\text{Node}, j}$  为第  $j$  跳发送节点和接收节点之间的纠缠粒子对数;  $K$  为最小纠缠粒子对数最大的通信路径;  $m$  为从源节点到目的节点的路径数目;  $L_{\text{Line}, l}$  为第  $l$  条路径上的路由度量。

将最小跳数作为第二优先级,则有

$$W = \min \{L_{\text{Line}, q}\}, 1 \leq q \leq m, \quad (17)$$

式中:  $W$  为最小跳数的路径;  $L_{\text{Line}, q}$  为第  $q$  条被选路径上的跳数,将最小跳数作为第二优先度量条件,考虑传输时延对量子态信息传输的影响,则路径中的跳数越少,通信时延越小。

### 3.3 量子卫星路由协议实现过程

量子卫星路由协议通过三个过程完成,分别为路由区域查询、路由发现、路由维护。具体实现过程如下。

#### 3.3.1 路由区域查询

在图 6 所示的卫星网络虚拟坐标中,假设 F5 为源节点, D7 为目的节点。坐标信息分别为  $(\zeta, \eta)$  和  $(\varsigma, \omega)$ , 在路由确定的过程中,考虑到最优路由可能在边界之外,适当放宽限制。路由边界  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$  可表示为

$$x_{\min} = \min \{\zeta, \varsigma\} - 1, \quad (18)$$

$$x_{\max} = \max \{\zeta, \varsigma\} + 1, \quad (19)$$

$$y_{\min} = \min \{\eta, \omega\} - 1, \quad (20)$$

$$y_{\max} = \max \{\eta, \omega\} + 1. \quad (21)$$

#### 3.3.2 路由发现

源节点向目的节点发送量子态信息时,路由协议发现过程如图 7 所示:

1) 查询 F5 节点路由表是否存在到 D7 的有效路由,若存在,则按照路由表中的路径信息进行传输;若不存在,则执行下一步。

2) 在确定的最小路由区域内, F5 向靠近 D7 的相邻中间节点发送量子路由请求 (QRREQ), QRREQ 的格式如图 8 所示,通过比较虚拟坐标信息确定导向路径:

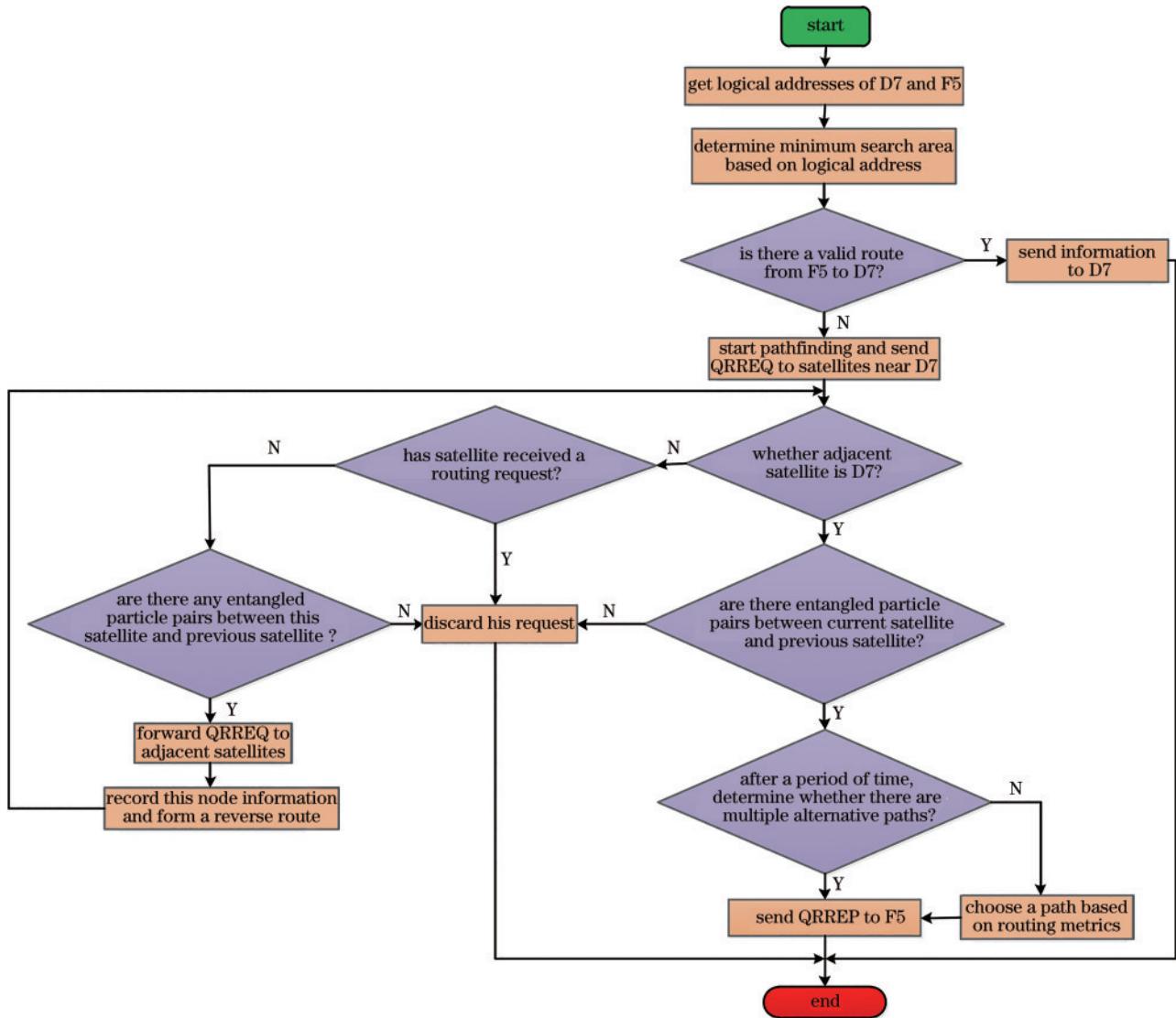


图 7 路由协议发现流程图

Fig. 7 Flowchart of routing protocol discovery

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \end{cases}, \quad (22)$$

$$\begin{cases} x \geq x_{\text{now}}, & x_{\text{ori}} \leq x_{\text{tar}} \\ x < x_{\text{now}}, & x_{\text{ori}} < x_{\text{tar}} \end{cases}, \quad (23)$$

式中:  $x_{\text{tar}}$  为目的节点的轨道坐标号;  $x_{\text{ori}}$  为源节点的轨道坐标号;  $x_{\text{now}}$  为当前节点的轨道坐标号;  $(x, y)$  为下一跳节点的虚拟坐标。

3) 中间节点 E5 和 F6 收到 QRREQ 时, 会检验自己是否是目的节点, 若发现自己不是目的节点

source node serial number	source node address	destination node address	last hop node address	record field
---------------------------	---------------------	--------------------------	-----------------------	--------------

图 8 量子路由请求消息

Fig. 8 Quantum routing request messages

D7, 则判断是否收到过该 QRREQ, 若已收到, 则将该 QRREQ 丢弃, 否则判断与上一跳节点有无纠缠粒子对; 若存在纠缠粒子对, 将 QRREQ 跳数加 1, 通过比较记录域中当前节点和上一节点拥有纠缠粒子对数和路由跳数的大小, 将最少粒子对数消耗和纠缠利用率最高、路由跳数最小的节点信息写入记录域, 更新其他路由信息, 建立当前节点到源节点的反向路由, 然后将新的量子路由请求向靠近目的节点的周围节点发送。否则, 将该 QRREQ 丢弃。

4) 通过中间节点转发, 最终目的节点收到相邻节点发送的 QRREQ, 在收到第一个 QRREQ 后, 并不立即向源节点发送量子路由回复消息 (QRREP), QRREP 格式如图 9 所示。等待一段时间后, 若出现多条备选路径, 则按照路由度量规则

source node address	destination node address	last hop node address	record field
---------------------	--------------------------	-----------------------	--------------

图 9 量子路由回复消息

Fig. 9 Quantum routing reply message

进行选取。如图 6 所示,最后确定 F5、E5、D5、D6、D7 的路径信息,然后向源节点发送 QRREP,将该信息沿反方向路由传送至源节点 F5,从而建立起从 F5 到 D7 的路由。

在图 8 和图 9 中,源节点序列号是中间节点用来区别来自源节点路由信息的新旧,避免形成环路。源节点每生成一个路由信息,则序列号加 1,记录域用来记录该信息经过的节点的信息,包括节点地址、路由跳数、路由度量等。初始化的路由跳数和路由度量均为 0,将上一跳节点地址初始化为源节点地址。

### 3.3.3 路由维护

在量子卫星网络中,卫星节点的移动和纠缠粒子对的消耗都会导致拓扑结构变化,从而导致路径中断,使信息传输失败。在本协议中,量子通信节

点应周期性检测其与上一跳节点之间的量子信道和无线信道。若量子信道检测不到纠缠粒子对或纠缠粒子对数目太少,则认为信道中断。对于无线信道,路径中节点定期向上、下一跳节点发送 Hello 消息,若长时间未收到 Hello 消息,则认为信道中断。若检测到信道中断,则通知源节点重新发起路由发现过程,重新建立源节点到目的节点的新路由。

## 4 两端纠缠交换量子卫星网络路由协议仿真

根据文献[26],两节点之间的量子信道的建立速率  $R$  为

$$R(F) = f_{\max} P_g(F), \quad (24)$$

式中:  $f_{\max}$  为节点光子产生纠缠粒子操作的最大频率;  $P_g(F)$  是节点产生一定保真度  $F$  的纠缠粒子对的成功率。如果源节点到目的节点之间需要经历多个卫星交换节点,采用逐跳纠缠交换方式的量子信道建立速率  $R_1(1, n)$  为

$$R_1(1, n) = \min \left\{ \min \left\{ \min [R(1, 2), R(2, 3)] P_c, R(3, 4) \right\} P_c, R(4, 5) \right\} P_c \cdots \min [R(1, 2) P_c^{n-2}, R(2, 3) P_c^{n-3}, R(3, 4) P_c^{n-4}, \dots, R(n-1, n) P_c], \quad (25)$$

式中:  $P_c$  为中继节点纠缠连接操作成功的概率;  $R(n-1, n)$  为量子信道的平均建立速率。

采用两端逼近纠缠交换方式的量子信道建立速率  $R_2(1, n)$  为

$$R_2(1, n) = \frac{1}{2} \min \left\{ \min \left\{ \min [R(1, 2), R(2, 3)] P_c, R(3, 4) \right\} P_c, R(4, 5) \right\} P_c \cdots \frac{1}{2} \min \left\{ R(1, 2) P_c^{n-2}, R(2, 3) P_c^{n-3}, R(3, 4) P_c^{n-4}, \dots, R(n-1, n) P_c \right\}. \quad (26)$$

当保真度确定时,假设基础链路量子信道的建立速率最大值为  $r_{\max}$ ,  $P_c$  为常数因子,利用泰勒展开式对(25)式和(26)式进行化简,可得

$$\Omega [R_1(1, n)] = \Omega (r_{\max} P^{n-2}), \quad (27)$$

$$\Omega [R_2(1, n)] = \Omega \left( \frac{1}{2} r_{\max} P^{n-2} \right), \quad (28)$$

式中:  $\Omega$  为郎伯 W 函数;  $P$  为成功建立纠缠连接的成功概率。

在量子卫星网络路由中,路由传输开销也是衡量路由协议的重要指标。假设用于测量信息传输的数据包的长度为  $L$ ,中间需要进行交换的量子卫星数为  $n$ ,那么采用逐跳纠缠交换方案传递量子态信息的无线传输开销  $O_1$  为

$$O_1 = \frac{1}{2} nL(n-1). \quad (29)$$

当中间转发节点的量子卫星的数目  $n$  为奇数,则采用两端纠缠交换路由方案的无线传输开销  $O_2$  为

$$O_2 = \left( \frac{n}{2} + 2n - 4 \right) L. \quad (30)$$

当中间转发节点的量子卫星数目  $n$  为偶数时,采用两端纠缠交换路由方案的无线传输开销  $O_2$  为

$$O_2 = \left( \frac{n-1}{2} + 2n - 5 \right) L. \quad (31)$$

分别对逐跳纠缠交换方案和两端逼近纠缠交换方案路由的量子信道平均建立速率和无线传输开销进行仿真,仿真结果如图 10 和图 11 所示

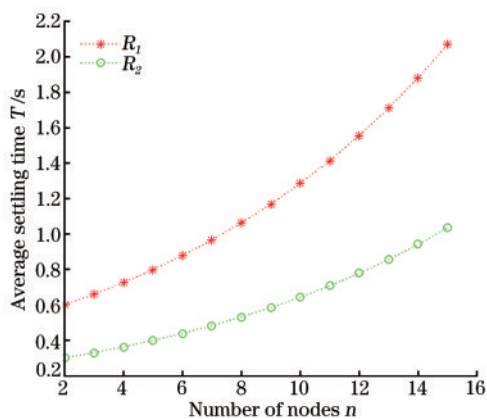


图 10 量子卫星路由信道建立速率

Fig. 10 Channel establishment rate of quantum satellite routing

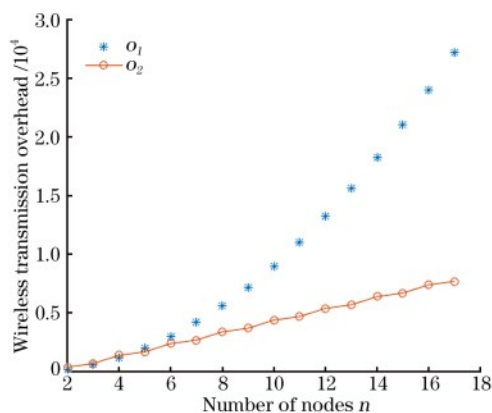


图 11 量子卫星网络路由开销

Fig. 11 Routing overhead of quantum satellite network

如图 10 所示,随着传输链路中卫星节点数目的增多,与逐跳纠缠交换方案相比,两端逼近纠缠交换方案在量子信道平均建立速率方面更具优势,在中间卫星节点数为 11 时,两端逼近纠缠交换方案的量子信道平均建立速率提升 43%,且随着中间卫星转发节点数的增加,两端逼近纠缠交换方案的优势也将更加明显。由图 11 可知,在量子态信息传输过程中,随着转发卫星节点数的增加,用于传输 Bell 态测量结果的无线通信传输开销会有所增加。采用两端逼近纠缠交换方案可以有效减少无线信道需要传送的数据包,并降低无线信道中信息传输过程中数据包发生冲突的概率。图 11 中用于测量结果的数据包的长度  $L = 200$  bit,随着转发卫星节点数目的增加,两端逼近纠缠交换方案在无线传输开销方面具有的优势也将越来越大,将会有效地提升信息的传输效率。由此可见,两端逼近纠缠交换方案在低轨道量子卫星网络中具有广阔的应用前景,也

将为量子卫星通信网络的构建提供理论参考,为量子卫星通信网络的发展提供坚实的理论基础。

## 5 结 论

基于全球量子卫星通信网络,提出一种两端逼近纠缠交换的量子卫星路由方案,结合量子卫星网络的特性并利用量子卫星虚拟坐标图的方法对全球量子卫星网络加以描述,在路由发现过程中先确定最小路由查询区域,并利用方向引导来完成路由发现。完成源节点到目的节点之间的路由路径寻找后,利用两端逼近纠缠交换方案来进行量子态信息的传递。仿真结果表明,采用两端逼近纠缠交换方案可有效地减小量子态信息的传输时延。两端逼近纠缠交换方案的量子信道平均建立速率明显优于逐跳纠缠交换的路由方案,在全球量子卫星通信网络中,两端逼近纠缠交换方案的路由开销明显低于逐跳纠缠交换的量子路由方案,有效降低了信息传输过程中数据包发生冲突的概率。所提出的两端逼近纠缠交换量子路由方案在量子卫星网络信息传输过程中具有显著的优势,有利于下一代移动卫星通信的发展,同时为全球量子卫星通信网络的构建提供理论研究基础。

## 参 考 文 献

- [1] Kurtsiefer C, Zarda P, Halder M, et al. A step towards global key distribution [J]. *Nature*, 2002, 419(6906): 450.
- [2] Ma X S, Herbst T, Scheidl T, et al. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward [J]. *Nature*, 2012, 489(7415): 269-273.
- [3] Peng C Z, Pan J W. Quantum science experimental satellite "Micius" [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(9): 1096-1104.  
彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星: "墨子号" [J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(9): 1096-1104.
- [4] Yin J, Ren J G, Lu H, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. *Nature*, 2012, 488(7410): 185-188.
- [5] Zhou N R, Zeng G H, Gong L H, et al. Quantum communication protocol for data link layer based on entanglement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(9): 5066-5070.  
周南润, 曾贵华, 龚黎华, 等. 基于纠缠的数据链路层量子通信协议 [J]. *物理学报*, 2007, 56(9): 5066-5070.



- [6] Zhou X Q, Wu Y W, Zhao H. Quantum teleportation internetworking and routing strategy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 42-47.  
周小清, 邹云文, 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): 42-47.
- [7] Yu X T, Xu J, Zhang Z C. Routing protocol for wireless ad hoc quantum communication network based on quantum teleportation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 56-63.  
余旭涛, 徐进, 张在琛. 基于量子远程传态的无线自组织量子通信网络路由协议[J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 56-63.
- [8] Zhang L, Nie M, Liu X H. Study on survival function of noise quantum channel and its simulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 32-38.  
张琳, 聂敏, 刘晓慧. 有噪量子信道生存函数研究及其仿真[J]. *物理学报*, 2013, 62(15): 32-38.
- [9] Liu X H, Nie M, Pei C X. Quantum wireless wide-area networks and routing strategy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(20): 200304.  
刘晓慧, 聂敏, 裴昌幸. 量子无线广域网构建与路由策略[J]. *物理学报*, 2013, 62(20): 200304.
- [10] Nie M, Shang P G, Yang G, et al. Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240303.  
聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240303.
- [11] Ren J, Nie M, Yang G, et al. Influences of multiple factors of natural environment on the performance of free space quantum communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(12): 1227003.  
任杰, 聂敏, 杨光, 等. 自然环境中多因子对自由空间量子通信性能的影响[J]. *光子学报*, 2015, 44(12): 1227003.
- [12] Yang G, Lian B W, Nie M. Characteristics of multi-hop noisy quantum entanglement channel and optimal relay protocol [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 240304.  
杨光, 廉保旺, 聂敏. 多跳噪声量子纠缠信道特性及最佳中继协议[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 240304.
- [13] Nie M, Liu G T, Yang G, et al. Voice over quantum IP routing based on least relay no de constrained optimization strategy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(12): 120302.  
聂敏, 刘广腾, 杨光, 等. 基于最少中继节点约束的量子 VoIP 路由优化策略[J]. *物理学报*, 2016, 65(12): 120302.
- [14] Nie M, Tang S R, Yang G, et al. Influence of the ionospheric sporadic E layer on the performance of quantum satellite communication in the mid latitude region [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070302.  
聂敏, 唐守荣, 杨光, 等. 中纬度地区电离层偶发 E 层对量子卫星通信性能的影响[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070302.
- [15] Zhang H L. Design and routing optimization of quantum cryptography communication network based on SDN [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.  
张红亮. 基于 SDN 的量子保密通信网络的设计和路由优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [16] Nie M, Wei R Y, Yang G, et al. An adaptive quantum state-hopping communication strategy based on kangaroo entanglement hopping model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(11): 110301.  
聂敏, 卫容宇, 杨光, 等. 基于袋鼠纠缠跳跃模型的量子状态自适应跳变通信策略[J]. *物理学报*, 2019, 68(11): 110301.
- [17] He Y F, Wang D, Yang H J, et al. Quantum key distribution based on heralded single photon sources and quantum memory [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0412001.  
何业锋, 王登, 杨红娟, 等. 基于指示单光子源和量子存储的量子密钥分配[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0412001.
- [18] Vasylyev D, Vogel W, Moll F. Satellite-mediated quantum atmospheric links [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(5): 053830.
- [19] Liu T, Zhu C, Sun C Y, et al. Influences of different weather conditions on performance of free-space quantum communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0227001.  
刘涛, 朱聪, 孙春阳, 等. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0227001.
- [20] Liu B Y, Zhang X Z, Xu X. Influence of soot agglomerated particles on quantum satellite communication performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0327001.  
刘邦宇, 张秀再, 徐茜. 煤烟凝聚粒子对量子卫星通信性能的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0327001.
- [21] Zhang X Z, Xu X, Liu B Y. Influence of fog on performance of free-space quantum communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0727001.

- 张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 雾对自由空间量子通信性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0727001.
- [22] Yin H, Ma H X. Introduction to military quantum communication[M]. Beijing: Military Science Press, 2006: 115-116.
- 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 115-116.
- [23] Nie M, Lei P, Yang G, et al. Research on quantum wireless multi-hop network routing protocol based on maximum weights entanglement distribution[J]. Journal of Quantum Optics, 2019, 25(1): 22-35.
- 聂敏, 雷鹏, 杨光, 等. 基于最大权重值纠缠分发的量子无线多跳网络路由协议研究[J]. 量子光学学报, 2019, 25(1): 22-35.
- [24] Li H. Research on the adaptive routing protocols in satellite networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- 李恒. 卫星网络自适应路由协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [25] Nie M, Ren J M, Yang G, et al. Influences of the ice-water mixed clouds on the performance of quantum satellite communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0927004.
- 聂敏, 任家明, 杨光, 等. 冰水混合云对量子卫星通信性能的影响[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0927004.
- [26] Cai X F. Wireless quantum communication network research based on partially entangled state [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- 蔡晓菲. 基于部分纠缠态的无线量子通信网络研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.