

基于量子远程传态的无线自组织量子通信 网络路由协议*

余旭涛^{1)†} 徐进²⁾ 张在琛³⁾

1) (东南大学, 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

2) (东南大学物理系, 南京 210096)

3) (东南大学, 移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

(2012年4月12日收到; 2012年6月7日收到修改稿)

针对复杂结构的无线量子通信网络, 提出了无线自组织量子通信网络概念并设计其路由协议. 该路由协议为按需路由协议, 路由度量基于相邻节点间的纠缠粒子对数目. 需要发送携带信息的量子态的节点发起路由请求和建立过程, 由目的节点根据路由度量选择路径. 目的节点选择路径后, 沿所选路径发送路由应答信息至源节点并通知路径中其他节点. 信息传输过程中, 若所选路径中相邻节点间无线信道或者量子信道中断, 将重新发起一个路由发现过程, 建立新路由. 路径中节点收到路由应答信息后, 利用纠缠交换和两端逼近方法, 从路径两端向中间节点方向进行纠缠交换, 建立量子信道后, 通过量子远程传态传输携带信息的量子态, 从而实现无线自组织量子通信网络中任意两节点间信息的传递.

关键词: 自组织网络, 量子通信网络, 量子远程传态, 纠缠交换

PACS: 03.67.Hk 42.50.EX

1 引言

量子通信网络将信息通过量子态编码传递, 突破现有网络的物理极限, 可以提供更快的信息处理速度和高安全性、高容量的传输^[1-3], 具有广阔的前景. 量子远程传态利用收发双方所共同拥有的纠缠量子对传送量子信息, 因其非局域性、不可逆性和瞬时性, 被广泛应用于量子通信网络中^[4-6]. 1993年利用量子纠缠的概念提出了量子态远程传态理论方案^[5], 同年基于量子远程传态提出了量子纠缠交换的方案^[7]. 1997年在国际上首次实验实现了量子远程传态^[8]和量子纠缠交换^[9]. 1998年, 提出了利用量子远程传态和量子纠缠交换实现量子中继器的理论方案^[10], 2000年提出了多粒子远程传态理论方案^[11], 2003年首次实验实现了基于纠

缠交换的量子中继器^[12]. 2010年实现了16 km自由空间量子态隐形传输^[13]. 基于量子远程传态和纠缠交换可以实现多节点远距离通信, 为复杂结构无线量子通信网络的研究奠定了基础.

上述这些研究从理论和实验上验证了构建量子通信网络的可行性, 在这些研究工作的基础上, 展开了对量子通信网络结构和协议的研究^[14-20]. Dupuis等设计了量子广播信道协议, Hsieh等对量子通信网络中的信道编码和网络容量问题进行了研究并设计相关协议, 周南润等设计了基于纠缠关联的数据链路层量子通信协议, 并在此基础设计了用于量子通信网络的选择重传量子同步通信协议, 有效提高了量子通信网络数据链路层最大吞吐量和信道利用率, 周小清等对量子隐形传态网络的互连和路由问题进行了研究. 上述研究为量子通信网络协议的设计分析奠定了基础, 但大部分工作

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 60902010)和东南大学移动通信国家重点实验室自主研究基金(批准号: 2012A03)资助的课题.

† E-mail: yuxutao@seu.edu.cn

基于简单网络结构的有线量子通信网络,如点对点、星型网络结构等,对复杂结构的无线量子通信网络研究较少. 2005年, Cheng 等提出了量子域内无线通信网络中的量子路由算法^[19],对已建立路由后量子态的传递进行研究,这是首次在量子领域内对无线通信问题进行研究,该方法主要利用量子远程传态和纠缠交换构建量子中继以及 Einstein-Podolsky-Rosen(EPR) 量子对桥来实现量子态在量子无线网络内的传递,所研究的网络结构为分层网络结构,并且未涉及对路由选择和建立的具体研究. 2007年,周南润等提出利用 EPR 纠缠对和隐形传态技术解决无线通信网络中的两军问题^[20].

本论文首次对无线自组织量子通信网络的网络模型和路由协议进行研究,提出了一种应用于具有复杂网络结构的无线自组织量子通信网络按需路由协议,并基于该协议采用两端逼近方法建立量子信道,利用远程传态传输携带信息的量子态.

2 无线自组织量子通信网络模型

无线自组织网络是一种得到广泛应用的主流无线网络^[21,22],网络中节点可以自行构建网络,具有高度的灵活性. 安全性是无线自组织网络面临的一大问题^[23],将量子远程传态技术应用于无线自组织通信网络不仅可以解决无线自组织网络的安全性问题,还可以提高网络容量^[24]. 无线自组织量子通信网络定义如下:网络具有自组织动态拓扑结构,网络节点为具有无线通信功能的移动量子设备,节点间存在量子信道和经典无线信道,节点间通过量子传输数据,经典无线信道作为辅助信道. 由于采用量子远程传态传递量子态需要两节点间存在纠缠粒子对,因此定义量子信道为:在无线自组织量子通信网络中,任意两节点如果共享一对纠缠粒子,则认为两节点间存在量子信道. 对应的网络模型如图 1 所示.

图 1 中,虚线表示量子信道,实线表示无线信道,节点间同时存在量子信道和无线信道的两节点组成相邻节点,相邻节点间数字用以表示两相邻节点所共享的纠缠粒子对数目. 模型中网络拓扑的改变不仅来自于节点的移动、加入和退出,无线链路的改变,还来自于量子信道的改变. 在网络工作过程中,由于各种原因,如退相干效应使得粒子退出

纠缠态或者测量使得原有纠缠关系消失或改变,造成相邻节点间不存在纠缠粒子对,导致相邻节点间的量子信道不再存在,网络的拓扑结构发生改变. 图 1 中所示的无线自组织量子通信网络模型具有以下特点:

1) 网络结构遵循无线自组织网络结构,网络中没有严格的中心控制节点,所有节点地位平等,每个节点都具有路由功能,相邻节点间可以直接通信,非相邻节点需要通过其他节点进行转发.

2) 信息携带在量子态上,采用量子远程传态和纠缠交换技术传输携带信息的量子态,在节点间存在量子信道后,其量子态的传输是瞬间实现的,传输时不需要知道对方位置,并且不会被任何障碍物所阻隔.

3) 量子远程传态和纠缠交换技术需要利用纠缠粒子对,在这样的传输方式下,纠缠粒子对成为了网络资源.

基于上述网络模型,我们设计了用于无线自组织量子通信网络的路由度量 and 路由协议.

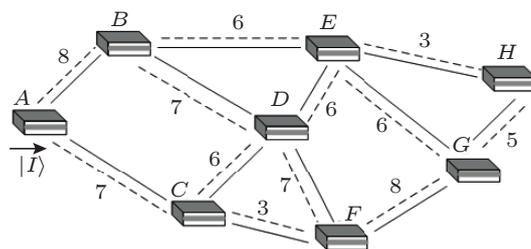


图 1 无线自组织量子通信网络模型

3 无线自组织量子通信网络按需路由协议

在无线自组织量子通信网络中,路由协议的主要作用是监控网络拓扑结构的变化,包括无线信道和量子信道的变化,交换路由信息,建立和维护路由,并根据路由选择转发携带信息的量子态. 传统的用于无线自组织通信网络的路由协议可以分为表驱动路由协议和按需路由协议^[25,26]. 表驱动路由协议需要节点周期性交换路由信息,这需要消耗网络资源且在网络拓扑变化的情况下效率较低;按需驱动路由协议不需要周期性交换路由信息,节点根据需要发起一个路由发现过程,适用于拓扑结构改变的网络. 由于无线自组织量子通信网络中同时存在量子信道和无线信道,并且量子信道随纠缠粒

子对的变化而变化, 与传统的无线自组织网络相比, 网络的拓扑结构更容易发生改变, 因此我们采用了按需路由协议. 该路由协议利用经典无线信道进行路由信息交互, 网络中每个节点维护一个路由表, 路由表中包含目的节点地址, 下一跳节点地址, 路由度量值以及路由的有效时间.

考虑到若采用量子远程传态传输信息, 需要消耗纠缠粒子对, 这使得纠缠粒子对成为网络资源. 为了避免量子信道因为纠缠粒子对的消耗而断开, 从而改变网络拓扑结构, 与传统网络一般采用跳数作为路由度量不同, 该路由协议的路由度量基于节点间纠缠态粒子对的数目. 其路由度量为

$$R = \min N_j, \quad 1 \leq j \leq n - 1, \quad (1)$$

式中 n 为一条路径所包含的节点数, N_j 为该路径上第 j 跳所对应的发送节点和接收节点间拥有的纠缠粒子对数目. 上式表明, 一条路径的路由度量为该路径上节点间所拥有的最小纠缠粒子对数目. 若存在多条从源节点到目的节点的可选路径, 其选路原则为从可选路径中选择路由度量值最大的路径

$$M = \max C_i, \quad 1 \leq i \leq m, \quad (2)$$

式中 m 为可选择路径的数目. C_i 为路径 i 所对应的路由度量值. 路由协议根据该路由度量选择路由, 路由协议由路由发现过程和路由维护过程两部分组成.

3.1 路由发现过程

当源节点需要传输携带信息的量子态时, 如果本节点路由表中不存在到目的节点的有效路由, 源节点将发起一个路由发现过程. 源节点广播一个路由请求消息 Route Request (RREQ). 该路由请求消息格式如图 2 所示, 其中源节点序列号用来识别不同的路由请求消息以避免形成环路. 源节点每产生一个新的路由请求消息其源节点序列号加 1, 该路由请求消息中路由度量初始值和跳数初始值设为 0, 上一跳节点地址设为源节点地址.

源节点广播路由请求消息后, 中间节点收到该路由请求消息, 对其进行处理. 首先将本节点与发送路由请求消息的节点间所拥有的纠缠粒子对数目记为 N_c , 根据源节点地址和源节点序列号检查

是否收到过相同的路由请求消息. 若收到过相同的路由请求消息或者 N_c 值为 0, 将丢弃本次收到的路由请求消息, 以避免多次重复广播相同路由请求消息以及在不存在量子信道的节点间广播路由消息. 否则将进行如下操作:

1) 更新路由请求消息中路由度量值. 若路由请求消息中路由度量值不为 0, 则将 N_c 与路由请求消息中路由度量值进行比较, 若 N_c 小于该路由度量值, 则修改路由度量值为 N_c , 否则路由请求消息中的路由度量值保持不变. 若该路由度量值为 0, 则修改路由度量值为 N_c .

2) 更新路由表以建立到源节点的反向路由. 首先检查路由表中是否存在到源节点的有效路由. 若存在且路由表中到源节点的路由度量值小于路由请求消息中的路由度量值, 则更新路由表中到源节点的路由, 将路由表中到源节点的下一跳地址修改为路由请求消息中上一跳节点地址, 路由表中路由度量值修改为路由请求消息中路由度量值, 并更新路由有效时间. 若存在且路由表中到源节点的路由度量值大于路由请求消息中的路由度量值, 则修改路由请求消息中的路由度量值为路由表中的路由度量值. 若路由表中不存在到源节点的有效路由, 则根据路由请求消息添加到源节点的路由. 中间节点建立到源节点的反向路由, 可使得目的节点回复路由应答消息时可沿所选路径的反向路由将路由应答消息传至源节点.

类型	路由度量	跳数
	目的节点地址	
	源节点地址	
	上一跳节点地址	
	源节点序列号	

图 2 路由请求消息格式

3) 更新路由请求消息中上一跳节点地址为当前节点地址, 并将跳数值加 1, 广播该路由请求信息.

经过中间节点的广播转发, 目的节点将收到来自不同邻居节点的相同路由请求消息. 收到第一个路由请求消息后, 目的节点将统计在一段时间内收到的路由请求消息, 若存在从源到目的节点的多条可选路径, 则目的节点选择路由度量值最大的路径. 若路由度量最大值对应多条路径, 则选择其中

最小跳数路径, 并根据选择路径更新路由表中到源节点路由. 随后目的节点产生路由应答消息 Route Reply(RREP) 并以逐跳的方式沿所选择路径的反向路径传递至源节点, 该路由应答消息格式如图 3 所示, 路径节点数为所选路径包含的节点数目, 路由度量和跳数的初始值为 0, 上一跳节点初始值为目的节点地址. 路径中每个节点收到该路由应答消息后, 将更新路由应答消息中的路由度量值, 更新方法与发送路由请求消息时路由度量值更新方法相同, 同时在路由表中根据所选路径建立到目的节点的路由信息, 并将应答消息中上一跳节点值设为本节点地址, 跳数值加 1. 源节点收到该路由应答消息后, 在路由表中添加至目的节点路由信息, 从而建立从源节点到目的节点的路由, 完成路由发现过程. 此后, 节点可以通过所选路径建立量子信道传送信息.

类型	路由度量	路径节点数	跳数
目的节点地址			
源节点地址			
上一跳节点地址			

图 3 路由应答消息格式

以图 1 中网络为例, 网络中节点 A 欲传输量子 I 的量子态 $|I\rangle$ 至节点 H . 假设源节点 A 的路由表中不存在到目的节点 H 的有效路由, 则节点 A 将广播一个路由请求消息. 中间节点 (B, C, D, E, F 节点) 收到该路由请求消息, 根据路由协议对其进行处理. 最终目的节点 H 将收到来自节点 E 和 G 的路由请求消息, 假设两条路由请求消息分别对应路径 $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow H$ 和 $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow H$. 由图 1 可知, 两条路径所对应的路由度量值分别为 3 和 5, 根据选路原则, 将选择路径 $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow H$. 随后节点 H 发送路由应答消息, 其中路由度量初始值为 0, 上一跳节点初始值设为节点 H 的地址. 该消息沿反向路径 ($H \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow A$) 单播至源节点 A . 中间节点收到路由应答消息, 根据所选路径, 在本节点路由表中设置到目的节点路由, 更新路由应答消息后转发到下一跳节点. 最终源节点 A 在路由表中添加到目的节点 H 的路由, 表中对应路由度量值设为 5, 下一跳节点设为节点 B , 完成路由发现过程.

3.2 路由维护过程

在无线自组织量子通信网络中, 节点的移动以及量子纠缠对的消耗等可能带来网络拓扑的改变, 造成所选路径中断, 信息传输失败, 因此该网络必须能对所选路径进行监测和维护. 本协议中, 每个节点对所选路径上本节点与下一跳节点间的量子信道和无线信道进行监测. 对于量子信道, 若两节点间不再存在纠缠粒子对, 则认为两节点间量子信道中断. 对于无线信道, 路径中节点周期性的发送一个 Hello 消息, 如果一个节点在一段时间内未能收到来自路径上下一跳的节点的 Hello 消息, 则认为两节点间的无线信道中断. 当节点监测到量子信道或者无线信道中断, 节点将发送一个路由错误消息, 通知路径上的源节点. 源节点收到该路由错误消息后, 将重新发起一个路由请求过程, 建立从源节点到目的节点的新路由.

3.3 基于路由协议的两端逼近量子信息传输方法

根据上述路由协议的特点, 在路由发现过程结束后, 路径中各节点获知本节点已作为所选路径中节点, 将进行量子态传递. 路径中节点可采用两端逼近的方法建立源和目的节点间的量子信道, 减少纠缠交换过程中通过经典信道传输测量结果的时间. 两端逼近方法将路由应答消息中路径节点数的值记为 K , 若 K 为奇数从路径上源和目的节点的相邻节点开始进行纠缠交换, 若 K 为偶数从源节点的相邻节点以及目的节点相邻节点的上一跳节点开始进行纠缠交换. 纠缠交换向中间节点方向进行, 测量结果由无线信道传送至下一节点, 直至中间节点收到来自两方向的测量结果. 在该节点进行纠缠交换并将测量结果所对应的新的纠缠粒子对的纠缠态, 通过无线信道传送至源节点. 通过该方法, 对于奇数节点路径产生了从源节点到目的节点间的纠缠粒子对, 对于偶数节点路径产生了源节点到目的节点上一跳节点间的纠缠粒子对. 源节点收到该测量结果后, 进行量子远程传态. 对于奇数节点路径, 量子远程传态后目的节点得到携带信息的量子态, 从而完成量子信息的传递. 对于偶数节点路径, 量子远程传态后路径上目的节点的相邻节点获得携带信息的量子态, 此后再通过一次量子远程传态, 将量子信息传送到目的节点.

例中根据选择路径 $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow H$ 进行量子信息传输所对应的量子逻辑线路如图 4 所示, 图中双实线表示无线信道. 中间节点 G, E 和 B 收到应答消息后, 确定自己为所选路径中节点, 节点 E 根据路由应答消息中路径节点数和跳数确定本节点为中间节点. 从节点 B 和 G 开始进行从两端节点向中间节点进行纠缠交换.

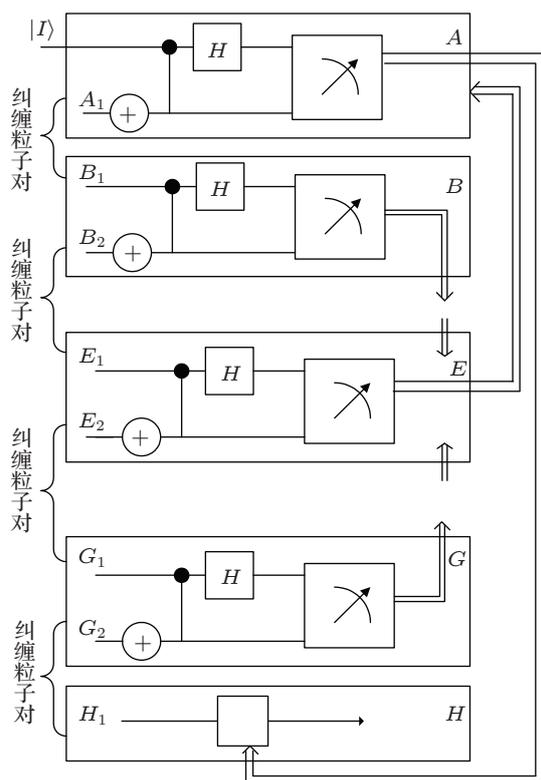


图 4 所选路径上节点量子逻辑线路图

以节点 B 为例, 假设一开始节点 B 中粒子 B_1 和节点 A 中粒子 A_1 处于纠缠态 $|\varphi^+\rangle_{A_1 B_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{B_1} + |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{B_1})$, 节点 B 中粒子 B_2 和节点 E 中粒子 E_1 处于纠缠态 $|\varphi^+\rangle_{B_2 E_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_{B_2} |0\rangle_{E_1} + |1\rangle_{B_2} |1\rangle_{E_1})$. 则 4 个粒子的总状态为

$$|\varphi\rangle_{A_1 B_1 B_2 E_1} = \frac{1}{2} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{B_1} + |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{B_1}) \otimes (|0\rangle_{B_2} |0\rangle_{E_1} + |1\rangle_{B_2} |1\rangle_{E_1}). \quad (3)$$

节点 B 中的粒子 B_1 和 B_2 经过 CNOT 门和 H 门后, 4 粒子总态可表示为

$$|\varphi\rangle_{A_1 B_1 B_2 E_1} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [|0\rangle_{B_1} |0\rangle_{B_2} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{E_1} + |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{E_1})$$

$$+ |0\rangle_{B_1} |1\rangle_{B_2} (|0\rangle_{A_1} |1\rangle_{E_1} + |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{E_1}) + |1\rangle_{B_1} |0\rangle_{B_2} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{E_1} - |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{E_1}) + |1\rangle_{B_1} |1\rangle_{B_2} (|0\rangle_{A_1} |1\rangle_{E_1} - |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{E_1})]. \quad (4)$$

上式表明, 节点 B 对粒子 B_1 和 B_2 进行 Bell 基测量, 当测量结果为 $|00\rangle$ 时, 粒子 A_1 和 E_1 处于 $|\varphi^+\rangle$ 态, 同理可得测量结果为其他三种情况下粒子 A_1 和 E_1 所处的 Bell 态, 这样两个从来没有相互作用的粒子 A_1 和 E_1 就纠缠起来. 节点 E 也做同样的操作, 使得粒子 H_1 和 E_2 纠缠起来. 节点 B 和 G 分别将测量所得到的粒子 A_1 和 E_1 的 Bell 态以及 E_2 和 H_1 的 Bell 态信息通过无线信道传送到节点 E . 节点 E 根据收到的结果, 进行 Bell 基测量, 以粒子 A_1 和 E_1 处于纠缠态 $|\varphi^+\rangle_{A_1 E_1}$, 粒子 E_2 和 H_1 处于纠缠态 $|\psi^+\rangle_{E_2 H_1}$ 为例, 经过图 4 中量子逻辑门后, 可得

$$|\varphi\rangle_{A_1 E_1 E_2 H_1} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [|0\rangle_{E_1} |0\rangle_{E_2} (|0\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1} + |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1}) + |0\rangle_{E_1} |1\rangle_{E_2} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1} + |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1}) + |1\rangle_{E_1} |0\rangle_{E_2} (|0\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1} - |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1}) + |1\rangle_{E_1} |1\rangle_{E_2} (|0\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1} - |1\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1})]. \quad (5)$$

这样, 粒子 A_1 和 H_1 形成了纠缠. 节点 E 将测量后粒子 A_1 和 H_1 所处的 Bell 态通过无线信道传送到节点 A . 以粒子 A_1 和 H_1 经过纠缠交换后所处的粒子态 $|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1} - |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1})$ 为例, 节点 A 收到该信息后, 将对加载了信息的量子 I 进行远程传态, 假设量子态 $|I\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (α, β 为复系数, 且满足 $\|\alpha\|^2 + \|\beta\|^2 = 1$), 则三个粒子的总态为

$$|\varphi\rangle_{I A_1 H_1} = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} (|0\rangle_I |0\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1} - |0\rangle_I |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1}) + \frac{\beta}{\sqrt{2}} (|1\rangle_I |0\rangle_{A_1} |1\rangle_{H_1} - |1\rangle_I |1\rangle_{A_1} |0\rangle_{H_1}). \quad (6)$$

上式可表示为

$$|\varphi\rangle_{I A_1 H_1} = \frac{1}{2} [(|0\rangle_I |0\rangle_{A_1} + |1\rangle_I |1\rangle_{A_1}) (\alpha|1\rangle_{H_1} - \beta|0\rangle_{H_1}) + (|0\rangle_I |0\rangle_{A_1} - |1\rangle_I |1\rangle_{A_1}) (\alpha|1\rangle_{H_1} + \beta|0\rangle_{H_1}) + (|0\rangle_I |1\rangle_{A_1} + |1\rangle_I |0\rangle_{A_1}) (-\alpha|0\rangle_{H_1} + \beta|1\rangle_{H_1}) + (|0\rangle_I |1\rangle_{A_1} - |1\rangle_I |0\rangle_{A_1})$$

$$\times (-\alpha|0\rangle_{H_1} - \beta|1\rangle_{H_1})]. \quad (7)$$

上式表明, 节点 A 对粒子 I 和 A_1 进行 Bell 基测量, 根据测量结果可知粒子 H_1 将坍缩到对应态. 节点 A 将测量结果通过无线信道传送到节点 H , 节点 H 根据测量结果, 对粒子 H_1 进行对应的么正变换, 粒子 H_1 的量子态变为 $|H\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. 至此, 通过路由协议确定路径后, 经过量子纠缠和隐形传态, 携带信息的粒子态 $|I\rangle$ 通过无线自组织量子通信网络从源节点 A 传递到了目的节点 H , 从而完成了量子信息的传递.

4 基于量子远程传态的无线自组织量子通信网络路由协议分析

传统无线网络按需路由协议中, 中间节点如果存在到目的节点的有效路径可以发送路由应答消息至源节点, 由源节点选择路径. 本文设计的无线自组织量子通信网络路由协议无论中间节点是否存在到目的节点的有效路由, 均不发送路由应答消息, 由目的节点根据收到的路由请求消息选择路径, 该特性适于无线自组织量子通信网络. 在利用量子隐形传态传输信息的无线自组织量子通信网络中, 随着量子信息的传输, 节点间纠缠粒子对的数目在不断变化, 而节点路由表中的路由在一定时间都认为是有效, 因此中间节点路由表中到目的节点的有效路由与网络当前节点间的纠缠粒子对状态不完全一致, 由目的节点选择路由, 由于路由请求消息中路由度量由网络当前纠缠粒子对情况确定, 所选路径更符合网络当前纠缠粒子对状态.

采用该路由协议, 中间节点不需要通过源节点逐跳发送信息才能获知本节点处于所选路径中, 可在路由发现过程结束后立刻采用两端逼近方法进行纠缠交换, 与源节点选择路径按顺序进行纠缠交换建立量子信道相比较减少量子信道建立时间. 同时基于该路由协议, 采用两端逼近方法建立量子信道传输量子态可以降低无线信道的开销. 采用文献 [19] 中的路由方法, 各节点的测量结果需要传递到目的节点, 假设携带测量结果的数据包的长度为 λ , 路径中节点数目为 n , 则传递一次量子信息的无线传输开销为

$$c = \frac{1}{2}n(n-1)\lambda. \quad (8)$$

采用本路由协议, 结合两端逼近方法建立量子

信道传输量子态, 对于所选路径上节点数为奇数的情况传递一次量子信息其无线传输开销为

$$c = \left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 2n - 4\right)\lambda. \quad (9)$$

对于所选路径上节点数为偶数的情况其无线传输开销为

$$c = \left(\left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor + 2n - 5\right)\lambda. \quad (10)$$

上式表明, 路径中节点数目越多, 采用两端逼近建立量子信道传递量子信息所节省的无线传输开销越显著, 可以降低无线信道需要传送的数据包, 降低无线信道中数据包冲突概率. 图 5 中携带测量结果数据包长度为 200 bit 时, 路径中不同节点数所对应的无线传输开销.

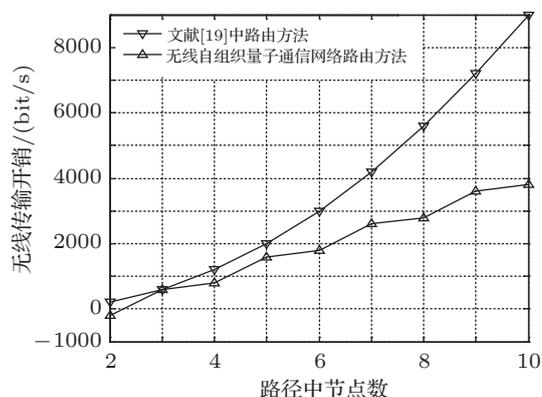


图 5 无线传输开销

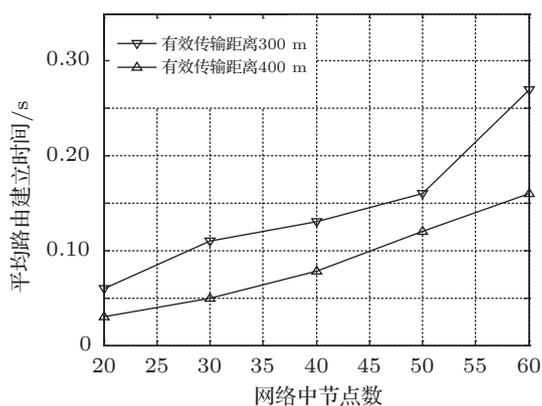


图 6 平均路由建立时间

采用离散事件仿真的方法, 对无线自组织量子通信网络路由协议进行仿真分析. 网络中节点随机分布在 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 范围内, 每个节点随机选择目的节点, 假设网络中每个节点与有效无线传输范围内的节点间拥有纠缠粒子对, 纠缠粒子对初始值

设为 (100—200) 间的随机整数. 改变网络中的节点数, 对不同有效无线传输距离下的平均路由发现时间进行统计. 平均路由发现时间是指网络中节点发出路由请求消息到收到来自目的节点的路由应答消息的平均时间. 统计结果如图 6 所示. 从图中可以看出, 在具有相同节点数时, 随着网络无线传输距离的增加路由发现时间减少, 这是由于传输距离增加, 网络中相邻节点的增加, 使得网络中任意两节点间的平均跳数减少导致. 在相同传输距离下, 随节点数目的增加, 路由发现时间增加, 这是由于网络中节点数目增加, 使得网络中产生转发路由请求和应答消息的次数增加, 造成排队等待以及冲突的可能性增加, 从而增加了路由发现时间.

5 结论

本文提出了无线自组织量子通信网络的概念, 设计了一种用于该网络的按需路由协议, 并基于路由协议设计了源和目的节点间量子信道建立方法,

通过该协议可在具有复杂网络结构的无线自组织量子通信网络任意节点间传输携带信息的量子态.

该路由协议的路由度量基于节点间的纠缠粒子对数目, 当节点有数据需要发送的时候, 广播路由请求消息, 中间节点收到该路由请求消息后, 修改并转发路由请求消息, 目的节点收到多个路由请求消息后, 根据路由度量, 选择路径, 并向源节点发送路由应答信息. 路径确定后, 通过纠缠交换, 采用两端逼近方法建立源节点和目的节点间的量子信道, 通过量子远程传态传输携带信息的量子态. 在传输过程中, 如果路径上两相邻节点间出现量子信道或者无线信道的中断, 将发起一个路由维护过程, 建立新的路由. 该路由协议由目的节点根据当前网络中纠缠粒子对状态选择路由, 更能反映当前网络状态. 基于该路由协议结合两端逼近方法建立量子信道传输量子态可减少量子信道建立所需时间, 有效降低了网络中无线信道传输开销, 减少了网络传输冲突.

- [1] Nielsen M A, Chuang I L 2000 *Quantum Computation and Quantum Information* (1st Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) p3
- [2] Mattle K, Weinfurter H, Kwiat P G, Zeilinger A 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4656
- [3] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Modern Phys.* **74** 145
- [4] Klauck H, Nayak A, Ta-Shma A, Zuckerman D 2007 *IEEE Trans. Info. Theory* **53** 1970
- [5] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [6] Bartlett S D, Rudolph T, Spekkens R W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 027901
- [7] Zukowski M 1993 *Phys. Lett. A* **177** 290
- [8] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [9] Pan J W, Bouwmeester D, Weinfurter H, Zeilinger A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3891
- [10] Briegel H J, Duer W, Cirac J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932
- [11] Yang C P, Guo G C 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 162
- [12] Zhao Z, Yang T, Chen Y A, Zhang A N, Zukowski M, Pan J W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 180401
- [13] 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, Chen K, Peng C Z, Pan J W 2010 *Nat. Photonics* **4** 376
- [14] Dupuis F, Hayden P, Li K 2010 *IEEE Trans. Info. Theory* **56** 2946
- [15] Hsieh M H, Wilde M M 2010 *IEEE Trans. Info. Theory* **56** 4682
- [16] Zhou N R, Zeng G H, Gong L H, Liu S Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5066 (in Chinese) [周南润, 曾贵华, 龚黎华, 刘三秋 2007 物理学报 **56** 5066]
- [17] Zhou N R, Zeng B Y, Wang L J, Gong L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2193 (in Chinese) [周南润, 曾宾阳, 王立军, 龚黎华 2010 物理学报 **59** 2193]
- [18] Zhou X Q, Wu Y W, Zhao H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 40304 (in Chinese) [周小清, 邬云文, 赵晗 2011 物理学报 **60** 40304]
- [19] Cheng S T, Wang C Y, Tao M H 2005 *IEEE J. Sel. Area. Comm.* **23** 1424
- [20] Zhou N R, Zeng G H, Zhu F C, Liu S Q 2006 *J. Shanghai Jiao-tong Univ.* **40** 1885 (in Chinese) [周南润, 曾贵华, 朱甫臣, 刘三秋 2006 上海交通大学学报 **40** 1885]
- [21] Li J, Paul S, Jain R 2011 *IEEE Comm. Mag.* **49** 26
- [22] Zhao Q, Tong L 2007 *IEEE J. Sel. Area. Comm.* **25** 589
- [23] Zhou L D, Haas Z J 1999 *IEEE Network* **13** 24
- [24] Bennett C H 1992 *Phys. Rev. Letter.* **69** 2881
- [25] Royer E M, Toh C K 1999 *IEEE Pers. Comm.* **6** 46
- [26] Kannhavong B, Nakayama H, Nemoto Y, Kato N, Jamalipour A 2007 *IEEE Wirel. Comm.* **14** 85

Routing protocol for wireless ad hoc quantum communication network based on quantum teleportation*

Yu Xu-Tao^{1)†} Xu Jin²⁾ Zhang Zai-Chen³⁾

1) (State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Department of Physics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

3) (State Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 12 April 2012; revised manuscript received 7 June 2012)

Abstract

A concept of wireless ad hoc quantum communication network is proposed and a routing protocol is designed for wireless quantum communication network with complex structure. The routing protocol is on-demand and the routing metric is based on the number of entangled particle pairs. The node that wants to send information carried by quantum state can initiate a route request and establishment procedure. The destination node chooses path by the routing metric and sends route reply message along the selected path. During the information transmission, if the quantum channel or the wireless channel between any neighbors in the selected path is broken, a route discovery process is reinitiated to set up a new route. Nodes in the selected path use a both-end approximation algorithm to establish a quantum channel. After the quantum channel is established, the quantum state is transferred by quantum teleportation and the information transfer between any two nodes in wireless ad hoc quantum communication network is finished.

Keywords: ad hoc network, quantum communication network, quantum teleportation, entanglement swapping

PACS: 03.67.Hk 42.50.EX

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60902010), and the State Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, China (Grant No. 2012A03).

† E-mail: yuxutao@seu.edu.cn