

量子无线广域网构建与路由策略*

刘晓慧^{1)2)†} 聂敏¹⁾ 裴昌幸²⁾

1) (西安邮电大学通信与信息工程学院, 西安 710061)

2) (西安电子科技大学, 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 710071)

(2013年5月12日收到; 2013年7月15日收到修改稿)

提出了一种基于多阶量子隐形传态的量子路由方案, 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. 该量子路由方案可以用来构建量子无线广域网, 其传输时延与所经过的链路距离和基站数目无关, 传输一个量子态所需的时间与采用量子隐形传态所需的时间相同. 因此, 从数据传输速率的观点来看, 该方案优于基于纠缠交换的量子路由方案.

关键词: 量子通信, 多阶量子隐形传态, 量子路由, 量子无线广域网

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Ex

DOI: 10.7498/aps.62.200304

1 引言

量子信息学和量子通信是当前信息学领域的研究热点, 我国科学家在本领域的研究成果引人注目. 中国科学院物理研究所吴令安教授领导的研究团队, 最近提出了全光纤量子通信系统中的高速偏振控制方案^[1], 该方案基于双向 Sagnac 环工作方式, 通过调节环中一个光纤电光相位调制器的相位差而精确控制光场偏振方向, 实现了单个端口输出各种偏振态, 无需后续耦合操作. 由于该方案的精度、调制速度和稳定性都很高, 并采用了器件简单、成本低廉的全光纤光路, 易于集成, 在量子保密通信等光通信领域中有很好的应用前景. 此外, 郭邦红等^[2]还研究了联合调制量子密钥分配系统, 该系统通过对每一个单光子信号进行相位和偏振两种编码调制, 实现联合调制量子密钥分配 (QKD). 结合复合 QKD 系统的双速协议, 给出了在理想情形下可以通过一个信号光子生成两比特密钥的 QKD 协议, 明显提高了 QKD 协议的内禀光子利用率. 在稳定性方面, 发展了联合调制的 Michelson 型 QKD 系统, 从而在原理上解决了联合调制 QKD 系

统的稳定性问题.

量子态远程传送和量子无线路由是实现量子无线通信的关键. 量子态远程传送可通过量子隐形传态来实现, 为此, 不同用户之间需要共享量子纠缠^[3,4]. 共享量子纠缠可通过生成一个纠缠光子对, 并且把纠缠光子对通过量子线路分发到源节点和目的节点来实现. 在无线信道中, 量子隐形传态面临很大困难, 因为纠缠光子对通过大气空间很难在通信终端之间进行分发^[5,6]. 这样, 量子移动用户之间就不能及时建立纠缠. 前不久, 潘建伟小组^[7]在青海湖完成了基于四光子纠缠的自由空间量子态隐形传送, 实现了百公里的双向纠缠分发. 该实验证明, 无论是从地面指向卫星的上行链路, 还是从卫星指向两个地球站的下行链路, 实现量子态隐形传态和量子纠缠分发都是可行的, 这为基于卫星的广域量子通信实现奠定了坚实的基础.

然而, 即便无线量子器件可以即刻产生并分发纠缠光子对^[8-13], 量子存储仍是个难题, 特别是在无线环境中. 用现有的量子移动存储设备来保持多个纠缠光子对提供给所有可能的通信者使用, 仍然是非常困难的. 因此, 需要研究一种新的量子态传输路由方案^[14-20]. 该方案允许量子态从一个站点

* 国家自然科学基金 (批准号: 61072067, 61172071)、国家重点实验室专项基金 (批准号: ISN1001004) 和陕西省教育厅专项科研计划 (批准号: 2011JK1017) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xhliu@xupt.edu.cn

到一个远程站点的隐形传送,即使这两个站点没有互相共享纠缠光子对. 之前所提出的很多方案,都是基于量子隐形传态和纠缠交换来实现多节点的远距离通信.

为此,本文提出了一种量子无线广域网 (quantum wireless wide-area networks, QWWAN) 的构建策略. 该策略采用了基于多阶量子隐形传态的量子路由方案,与基于量子隐形传态和纠缠交换的路由方案相比,本方案不需要在各中间节点逐一进行纠缠交换,只需在各节点同时进行量子门操作和量子测量,就能完成量子路由建立,从而实现量子态的远程传输.

2 基于多阶量子隐形传态的量子路由方案

本量子路由方案是通过多阶量子隐形传态来实现的,其前提是假设源节点和目的节点共享了多

对纠缠光子. 对于一个存储容量受限的量子移动终端而言,与其他量子终端都共享纠缠光子对显然是不可能的. 另外,受自由空间纠缠光子分发距离的限制,一个量子移动终端和量子无线广域网中距离较远的终端共享纠缠光子对也是不可能的. 因此,需要一种新的量子态传输方案. 即使源节点和目的节点不共享任何纠缠光子对,也能实现量子态的远程传送. 本文提出的多阶量子隐形传态能够满足这一要求,它是借助中间节点,将特定的量子态从源节点传输到目的节点的.

图 1 是多阶量子隐形传态的量子路由方案,其中源节点 (Alice) 和目的节点 (Bob) 之间没有共享量子纠缠比特,而是通过中间节点进行相应的量子路由操作,完成量子态的传送.

2.1 二阶量子隐形传态

二阶量子隐形传态是借助一个中间节点完成量子态隐形传送的,其量子线路图如图 2 所示. 首

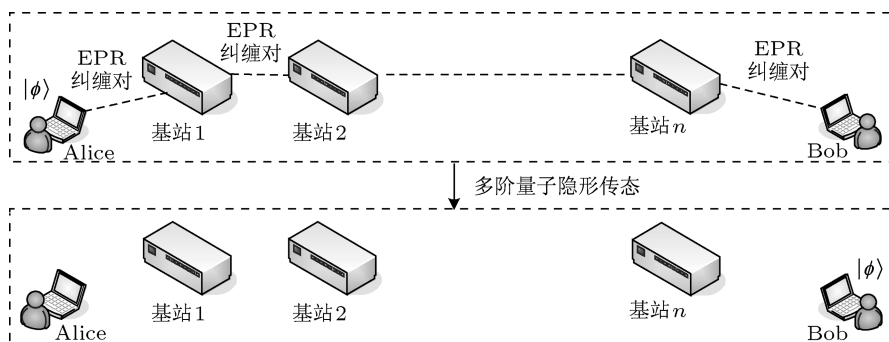


图 1 基于多阶量子隐形传态的量子路由方案

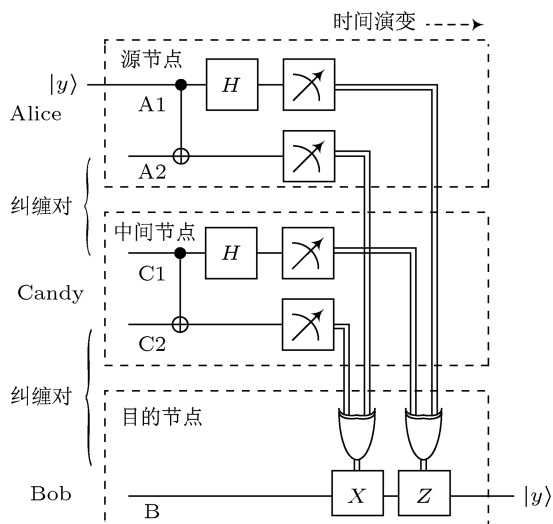


图 2 二阶量子隐形传态的量子线路图

先,假设 Alice 传输量子态 $|y\rangle$ 给 Bob, 传输需要通过中间节点 Candy. 量子态 $|y\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, 其中 α 和 β 都是量子态的概率幅, 即 $\|\alpha\|^2 + \|\beta\|^2 = 1$. Alice 的第二个量子比特和中间节点 Candy 的第一个量子比特构成一个纠缠对, 同样 Candy 的第二个量子比特和 Bob 的量子比特构成另一个纠缠对. 在开始时, 整个五量子比特系统可以表示为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} |y\rangle \otimes (|0\rangle_{A2} |0\rangle_{C1} + |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C1}) \\ & \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ & = \frac{1}{2} (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)_{A1} \\ & \otimes (|0\rangle_{A2} |0\rangle_{C1} + |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C1}) \\ & \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B), \end{aligned} \quad (1)$$

下标 (A1, A2, B, C1, C2 等) 代表各节点量子态的序号. 如 A1 代表 Alice 的第一量子比特, C2 代表 Candy 的第二个量子比特.

Alice 和 Candy 都对他们的量子比特进行 CNOT 门操作, 其结果如下:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha |0\rangle_{A1} \otimes |0\rangle_{A2} |0\rangle_{C1} \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \alpha |0\rangle_{A1} \otimes |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C1} \otimes (|1\rangle_{C2} |0\rangle_B + |0\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \beta |1\rangle_{A1} \otimes |1\rangle_{A2} |0\rangle_{C1} \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \beta |1\rangle_{A1} \otimes |0\rangle_{A2} |1\rangle_{C1} \otimes (|1\rangle_{C2} |0\rangle_B + |0\rangle_{C2} |1\rangle_B) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

接着, Alice 和 Candy 对他们的第一量子比特进行 Hadamard 门操作, 结果为

$$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} \alpha (|0\rangle + |1\rangle)_{A1} \otimes |0\rangle_{A2} \otimes (|0\rangle + |1\rangle)_{C1} \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \alpha (|0\rangle + |1\rangle)_{A1} \otimes |1\rangle_{A2} \otimes (|0\rangle - |1\rangle)_{C1} \otimes (|1\rangle_{C2} |0\rangle_B + |0\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \beta (|0\rangle - |1\rangle)_{A1} \otimes |1\rangle_{A2} \otimes (|0\rangle + |1\rangle)_{C1} \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_B + |1\rangle_{C2} |1\rangle_B) \\ + \beta (|0\rangle - |1\rangle)_{A1} \otimes |0\rangle_{A2} \otimes (|0\rangle - |1\rangle)_{C1} \otimes (|1\rangle_{C2} |0\rangle_B + |0\rangle_{C2} |1\rangle_B) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

(3) 式可改写为

$$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} (|0\rangle_{A1} |0\rangle_{C1} + |1\rangle_{A1} |1\rangle_{C1}) \otimes (|0\rangle_{A2} |0\rangle_{C2} + |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C2}) \otimes (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle)_B \\ + (|0\rangle_{A1} |0\rangle_{C1} + |1\rangle_{A1} |1\rangle_{C1}) \otimes (|0\rangle_{A2} |1\rangle_{C2} + |1\rangle_{A2} |0\rangle_{C2}) \otimes (\alpha |1\rangle + \beta |0\rangle)_B \\ + (|0\rangle_{A1} |1\rangle_{C1} + |1\rangle_{A1} |0\rangle_{C1}) \otimes (|0\rangle_{A2} |0\rangle_{C2} + |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C2}) \otimes (\alpha |0\rangle - \beta |1\rangle)_B \\ + (|0\rangle_{A1} |1\rangle_{C1} + |1\rangle_{A1} |0\rangle_{C1}) \otimes (|0\rangle_{A2} |1\rangle_{C2} + |1\rangle_{A2} |0\rangle_{C2}) \otimes (\alpha |1\rangle - \beta |0\rangle)_B \end{bmatrix}. \quad (4)$$

可以看出, 一旦 Bob 获得 Alice 的两个量子比特状态和 Candy 的两个量子比特状态, 就可得知自己的量子比特状态信息. 例如, 如果 Alice 的两个量子比特是 $|0\rangle_{A1} |1\rangle_{A2}$, Candy 的两个量子比特是 $|0\rangle_{C1} |1\rangle_{C2}$, 那么 Bob 的量子比特一定是 $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$; 如果 Alice 的两个量子比特是 $|0\rangle_{A1} |0\rangle_{A2}$, Candy 的两个量子比特是 $|1\rangle_{C1} |1\rangle_{C2}$, 那么 Bob 的量子比特一定是 $\alpha |1\rangle - \beta |0\rangle$. 这些量子比特测量结果必须通过经典信道传送给 Bob.

收到测量结果后, Bob 可以据此对其量子态运用相应的量子门操作以恢复 $|y\rangle$. 表 1 是五量子系统测量结果及所需量子门操作. 可以看出:

1) 若 Alice 的第一个量子比特与 Candy 的第一个量子比特进行异或运算, 结果是 0, Alice 的第二个量子比特与 Candy 的第二个量子比特进行异或运算, 结果是 0, 那么 Bob 无需进行量子门的操作;

2) 若 Alice 的第一个量子比特与 Candy 的第一个量子比特进行异或运算, 结果是 0, Alice 的第二个量子比特与 Candy 的第二个量子比特进行异或运算, 结果是 1, 那么 Bob 需要用量子 X 门来操作他的量子比特, 使之变为量子态 $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ 即 $|y\rangle$;

3) 若 Alice 的第一个量子比特与 Candy 的第一

个量子比特进行异或运算, 结果是 1, Alice 的第二个量子比特与 Candy 的第二个量子比特进行异或运算, 结果为 0, 那么 Bob 需要用量子 Z 门来操作他的状态, 使之变为量子态 $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$;

4) 同样, 若 Alice 的第一个量子比特异或 Candy 的第一个量子比特的结果是 1, Alice 的第二个量子比特异或 Candy 的第二个量子比特的结果是 1, 那么 Bob 需要先应用量子 X 门再应用量子 Z 门来操作他的状态, 使之变为量子态 $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$.

表 1 五量子系统测量结果与所需量子门操作

A1 异或 C1	A2 异或 C2	应用操作
0	0	无
0	1	X 门
1	0	Z 门
1	1	X 和 Z 门

2.2 三阶量子隐形传态

三阶量子隐形传态是借助于两个中间节点, 完成量子态的隐形传送. 假定 Alice 和 Bob 需通过两个中间节点 (Candy 和 David) 传输量子态 $|y\rangle$, 如图 3 所示.

同样,对七量子比特系统而言,可以表示为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} |y\rangle \otimes (|0\rangle_{A2} |0\rangle_{C1} + |1\rangle_{A2} |1\rangle_{C1}) \\ & \otimes (|0\rangle_{C2} |0\rangle_{D1} + |1\rangle_{C2} |1\rangle_{D1}) \\ & \otimes (|0\rangle_{D2} |0\rangle_B + |1\rangle_{D2} |1\rangle_B). \end{aligned} \quad (5)$$

采用与二阶量子隐形传态同样的操作,其量子线路如图3.表2给出了七量子系统测量结果与所需量子门操作之间的联系.在表2中,Bob可以在收到测量结果后,根据测量结果对其量子态运用相应的量子门操作以恢复量子态 $|y\rangle$.

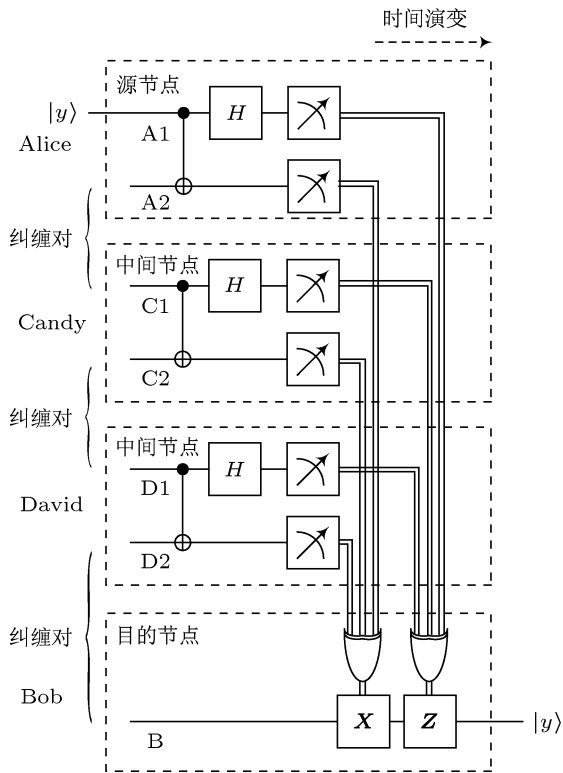


图3 三阶量子隐形传态的量子线路图

表2 七量子系统测量结果和所需量子门操作之间的联系

A1 异或 C1 异或 D1	A2 异或 C2 异或 D2	应用的操作
0	0	无
0	1	X 门
1	0	Z 门
1	1	X 和 Z 门

综上所述可以看出,以上所提出的量子路由方案能够通过一个或一个以上的中间节点进行量子态的远程传送.此外,图1所示的量子路由方案,其量子电路必须并行执行.因此,各节点的量子门操作与量子测量同步执行,完成多节点量子路由的执行时间与量子隐形传态的执行时间相同.即量子路由方案的数据速率与量子隐形传输的数据速率相同.

2.3 仿真分析

基于上述分析,假设量子隐形传态的平均时间为 T' 完成量子纠缠交换的时间为 T'' ,路由通过的中继节点数为 n ,在位置数据库中查找信息的时间为 u ,纠缠源产生并分发纠缠对的平均时间为 r .

设量子纠缠交换路由传输一个量子态需要的时间为 T_1 ,则

$$T_1 = T' + nT''. \quad (6)$$

同样,多阶量子隐形传态的路由方案传输一个量子态所需要的时间为 T_2 ,则

$$T_2 = u + r + T'. \quad (7)$$

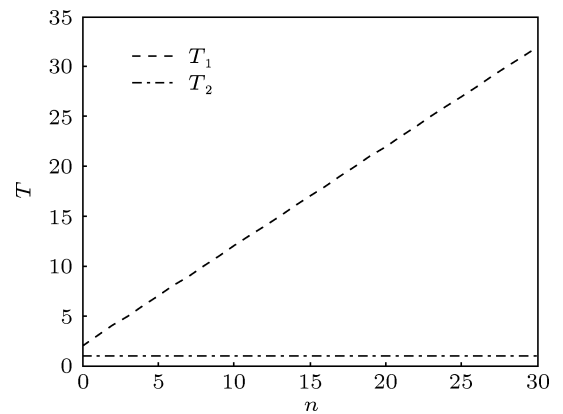


图4 两种情况下传输一个量子态所需的时间与节点数的关系

图4给出了量子纠缠交换与多阶量子隐形传态两种情况下传输一个量子态所需时间与中间节点数的量化关系,其中 $T' \cong T'' = 1 \mu\text{s}$, $u = 0.01T'$, $r = 0.01T'$.从图4可以看出,随着中间节点数目的增大,量子纠缠交换路由方案传输量子态所需时间随着节点数目线性增加,相比之下,多阶量子隐形传态的路由方案传输量子态所需时间不随节点数变化.因此,多阶量子隐形传态的路由方案在传输时延上有明显优势.

3 量子无线广域网

量子无线广域网采用了两层位置管理数据库的网络体系结构,如图5所示.该网络的主要组成部分包括量子无线基站(QWBS),用户位置数据库,卫星EPR发生器和量子移动终端.图5(a)表示通信双方处于同一个卫星覆盖范围内的情况,图5(b)表示通信双方不在同一卫星覆盖范围内的情况.

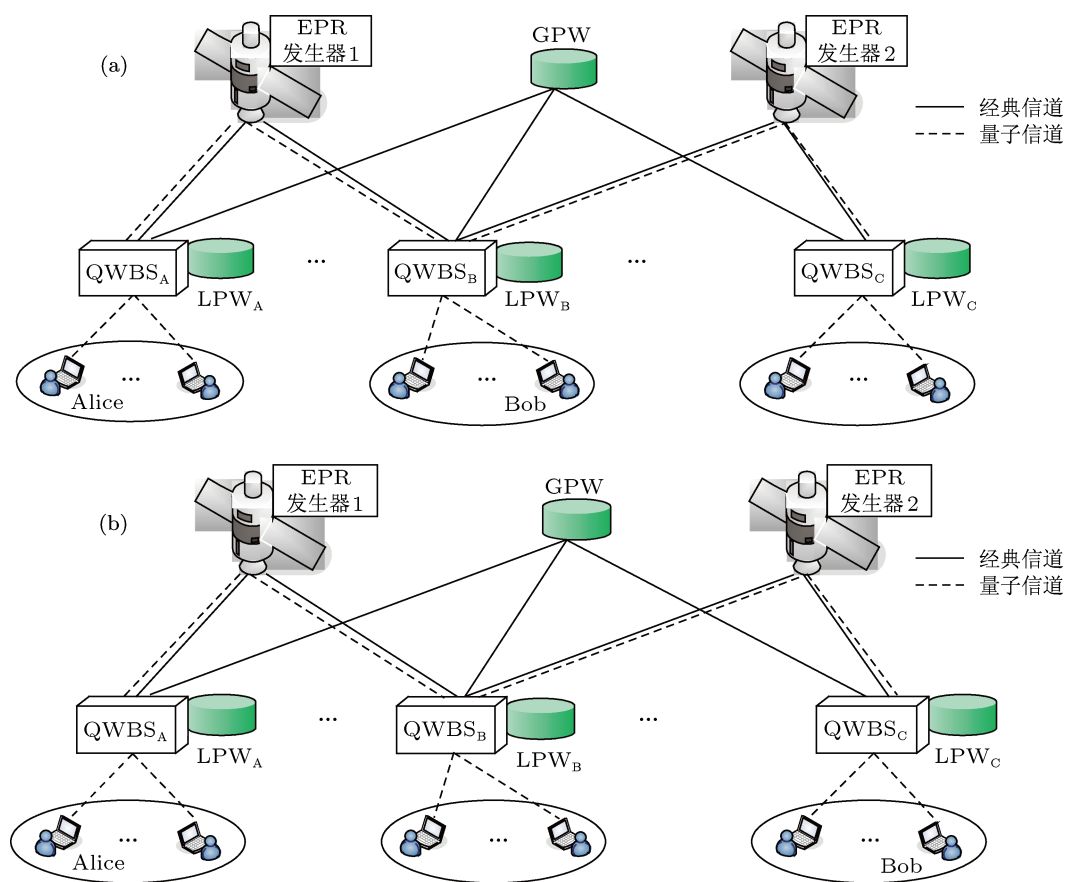


图5 量子无线广域网网络结构 (a) 通信双方处于同一个卫星的覆盖范围内; (b) 通信双方不在同一卫星的覆盖范围内

在图5中,量子无线基站是无线接入点与有线网络间的接口,也是纠缠光子产生和分发点,可进行量子门操作和量子态的测量,进而完成量子路由任务.每个量子无线基站配有多个无线收发器,用于传输和接收经典信息.由于每个量子无线基站有其有效覆盖范围(即量子无线基站的覆盖区),该基站主要的功能有三:一是建立基站之间的量子信道;二是建立基站与移动终端之间的量子信道;三是对其覆盖区内的量子移动终端进行位置和状态管理.

位置数据库分为局部位置数据库(local position warehouse, LPW)和全局位置数据库(global position warehouse, GPW).每个量子无线基站都配备了LPW. LPW是用于量子移动用户管理的数据库,可存储覆盖范围内量子移动终端的用户信息.各用户必须在LPW中登记注册.

GPW是存储所有量子移动终端位置信息的动态数据库.在量子无线广域网中,至少应配置一个GPW,它与多个量子无线基站相连.通过询问GPW,可以找出一个特定的量子移动终端在哪个量子无

线基站的覆盖范围内.因此,GPW中存储的数据需要经常更新.

在量子无线广域网中,还包括EPR发生器.位于卫星上的EPR发生器可产生并分发纠缠光子对,其主要功能是建立基站间的量子信道,并将产生的纠缠光子对分发给两个基站.由图5可以看出,卫星EPR发生器也只能在其覆盖区内的基站之间建立量子线路.此外,一些基站会同时处于两个EPR发生器的覆盖交叠区内,如基站QWBS_B.

4 路由策略

为了分析路由策略,下面以不同基站覆盖范围内的情况为例.设Alice处于基站QWBS_A下,她想给Bob发送一个量子比特,其路由建立过程如下.

初始状态下,Alice先给QWBS_A发送一个请求,即她需要将量子比特发送给Bob.然后,QWBS_A查询自己的LPW,以便核对Bob是否处于自己的服务区内.当LPW发现Bob不在本服务区内时,QWBS_A查询GPW,以判断Bob属于哪个基站.这

时可能出现以下两种情况.

情况 1 Alice 和 Bob 所处的基站在同一颗卫星的覆盖范围内, 如图 5(a) 所示. 在这种情况下, GPW 会通知 QWBS_A 关于 Bob 的具体位置. 在通信过程中, QWBS_A 请求卫星 EPR 发生器产生并分发纠缠光子对给 QWBS_A 和 QWBS_B, 该纠缠对便成为 Alice 和 Bob 间的信道. 所以, 在 Alice 和 Bob 之间, 其路由为 Alice \leftrightarrow QWBS_A \leftrightarrow QWBS_B \leftrightarrow Bob, 可实现量子态传输.

情况 2 Alice 和 Bob 所处的基站不在同一颗卫星的覆盖范围内, 如图 5(b) 所示. 在这种情况下, GPW 发现 Bob 在 QWBS_C 下, 但是两个基站并不在同一个卫星的覆盖范围内, QWBS_A 在卫星 1 的覆盖范围内, QWBS_C 在卫星 2 的覆盖范围内. 这时, GPW 找到既在卫星 1, 又在卫星 2 覆盖下的基站 QWBS_B. GPW 通知 QWBS_A, Bob 在 QWBS_C 的覆盖范围内. QWBS_A 请求 EPR 发生器 1 产生并分发纠缠光子对给 QWBS_A 和 QWBS_B, 同时 QWBS_B 请求 EPR 发生器 2 产生并分发纠缠光子对给 QWBS_B 和 QWBS_C. 此时, QWBS_A, QWBS_B 和 QWBS_C 将成为 Alice 和 Bob 之间的中间节点. 因而, 在 Alice 和 Bob 之间就建立路由通道: Alice \leftrightarrow QWBS_A \leftrightarrow QWBS_B \leftrightarrow QWBS_C \leftrightarrow Bob. 一旦量子路由完成, 即可实现量子态传输.

同理, 当 Alice 和 Bob 的距离更远时, 需要增加更多的中间节点, 选择一条最佳的路由, 如图 6 所示. 因此, 借助卫星作为中间节点, 就可实现网络中任意两节点的通信.

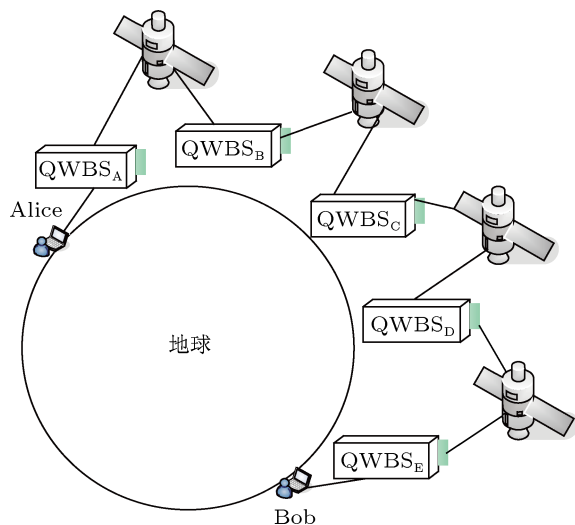


图 6 通信双方在较远的两端实现通信

在图 6 中, Alice 和 Bob 通过四颗卫星的量子

信道相连通. 他们首先都要通过 LPW 和 GPW, 找到目的端的位置关系, 确定其状态. 通过覆盖卫星的位置, 选出最佳路由. 由于不同情况下所涉及的卫星数目不同, 路由选择的节点数目各异. 但是, 通过 GPW 可准确找到最少中间节点的路由, 减少网络负荷.

为了明晰不同情况下量子路由建立过程的特点, 以下对各情况的优劣进行比较分析.

同一基站覆盖范围内的用户之间通信, 只需查询本地 LPW, 无需查询 GPW, 本地基站作为中间节点, 采用两阶量子隐形传态就可以实现量子态传输. 路由建立过程简单, 通信距离仅限于基站的覆盖范围内. 而不同基站覆盖范围内的用户通信, 就需要查询 GPW 以确定路由. 情况 1 中通信双方所属基站在同一卫星的覆盖范围内, 两个基站作为中间节点, 采用三阶量子隐形传态才可以实现量子态传输. 在这种路由建立过程中, 路由选择相对简单. 情况 2 中通信双方所属的基站不在同一卫星的覆盖范围内, 则需要借助更多的中间节点, 采用四阶及四阶以上的量子隐形传态来实现量子态传输, 此时的路由寻找过程最复杂, 但量子通信的距离得到延伸.

5 方案的特点

与相关文献 [18—20] 所涉及的方案相比, 本方案能够在两个节点没有共享纠缠光子对的情况下, 实现量子态的远程隐形传送. 并且本方案的主要优势在于:

1) 本方案基于多阶量子隐形传态, 路由通道上的各节点同时进行量子门操作和量子测量, 完成量子路由建立过程, 而文献方案基于纠缠交换技术, 需要在各中间节点逐一进行纠缠交换, 直至在源节点和目的节点之间建立量子连接, 再进行量子隐形传态;

2) 本方案传输时延小, 完成多阶量子隐形传态所需时间, 与采用量子隐形传态的时间相等, 而文献方案的量子态传输时间与路由跳数成正比.

很显然, 从传输时延的角度考虑, 本方案非常适合广域网的构建, 而文献方案则适用于局域网的构建.

6 结论

为了构建量子无线广域网, 本文提出了基于多阶量子隐形传态的量子路由方案, 分析了量子无线

广域网的网络模型和路由建立过程. 结果表明, 通过在各中间节点并行执行量子门操作, 不论中间节点数量的多少, 其量子态传输时延与采用量子隐形传态的时延相等. 与基于量子交换的方案相比, 本

策略在传输时延方面具有明显的优势. 量子无线广域网能够将量子通信的安全保密性与无线通信的灵活性相结合, 是未来量子通信发展的方向.

-
- [1] Li S, Ma H Q, Wu L A, Zhai G J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084214 (in Chinese) [李申, 马海强, 吴令安, 翟光杰 2013 物理学报 **62** 084214]
 - [2] Guo B H, Yang L, Xiang C, Guan C, Wu L A, Liu S H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130303 (in Chinese) [郭邦红, 杨理, 向憧, 关翀, 吴令安, 刘颂豪 2013 物理学报 **62** 130303]
 - [3] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Manfred E, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
 - [4] Chen P, Deng F G, Long G L 2006 *Chin. Phys.* **15** 2228
 - [5] Pan J W, Simon C, Brukner C, Zeilinger A 2001 *Nature* **410** 1067
 - [6] 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 *Nature Photon.* **4** 376
 - [7] 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
 - [8] Kwiat P G, Waks E, White A G, Appelbaum I, Eberhard P H 1999 *Phys. Rev. A* **60** R773
 - [9] Raimond J M, Brune M, Haroche S 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 565
 - [10] Sun B, Chapman M S, You L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 042316
 - [11] Artur S, Regina B H, Barry C S, Wolfgang T 2009 *Phys. Rev. A* **80** 062310
 - [12] Dousse A, Suffczyński J, Beveratos A, Krebs O, Lemaître A, Sagnes I, Bloch J, Voisin P, Senellart P 2010 *Nature* **466** 217
 - [13] Guo Z, Yan L S, Pan W, Luo B, Xu M F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060301 (in Chinese) [郭振, 闫连山, 潘炜, 罗斌, 徐明峰 2011 物理学报 **60** 060301]
 - [14] Song K H, Zhang W J, Guo G C 2002 *Chin. Phys. Lett.* **11** 218
 - [15] Peng C Z, Yang T, Bao X H, Zhang J, Jin X M, Feng F Y, Yang B, Yang J, Yin J, Zhang Q, Li N, Tian B L, Pan J W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 150501
 - [16] Bourgoin J P, Meyer-Scott E, Higgins B L, Helou B, Erven C, Hübel H, Kumar B, Hudson D, D'Souza I, Girard R, Laflamme R, Jennewein T 2013 *New J. Phys.* **15** 023006
 - [17] Liu X H, Pei C X, Nie M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 120303
 - [18] Zhu C H, Pei C X, Ma H X, Yu X F 2006 *J. Xidian Univ.* **33** 839 (in Chinese) [朱畅华, 裴昌幸, 马怀新, 于晓飞 2006 西安电子科技大学学报 **33** 839]
 - [19] Zhou X Q, Wu Y W, Zhao H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040304 (in Chinese) [周小清, 邬云文, 赵晗 2011 物理学报 **60** 040304]
 - [20] 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]

Quantum wireless wide-area networks and routing strategy^{*}

Liu Xiao-Hui^{1)2)†} Nie Min¹⁾ Pei Chang-Xing²⁾

1) (School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunication, Xi'an 710061, China)

2) (State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 12 May 2013; revised manuscript received 15 July 2013)

Abstract

According to multistage quantum teleportation, we here propose a quantum routing scheme which teleports a quantum state from one quantum device to another wirelessly even though the two devices which do not share entangled photon pairs mutually. By the quantum routing scheme, the model of quantum wireless wide-area networks is presented. In terms of time complexity, the proposed scheme transports a quantum bit in the time almost the same as the quantum teleportation regardless of the number of hops between the source and destination node. From this point of view, the quantum routing scheme is close to optimal scheme in data transmission time. The correlative routing process is proposed under different conditions. The quantum state is transferred by multistage quantum teleportation, therefore, the information transfer between any two nodes in quantum wireless wide-area networks is realized.

Keywords: quantum communication, multistage quantum teleportation, quantum routing, quantum wireless wide-area networks

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Ex

DOI: 10.7498/aps.62.200304

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61072067, 61172071), the State Key Laboratory of Integrated Services Networks, China (Grant No. ISN1001004), and the Scientific Research Project of the Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2011JK1017).

[†] Corresponding author. E-mail: xhliu@xupt.edu.cn