

文章编号:1004-4213(2011)05-0774-6

陆地量子移动通信最优纠缠多址中继方案

聂敏, 姜劲雅, 刘晓慧

(西安邮电学院 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘要:为了解决 EPR 纠缠通过大气空间在通信终端之间的分发问题,使量子移动用户之间及时建立纠缠,提出了一种新的陆地量子移动通信网络的量子纠缠多址中继方案和分区服务模型. 分析比较了基于量子受控非门和极化分束器的两种纠缠纯化方法. 结果表明:即使在量子移动终端之间没有共享 EPR 纠缠对的情况下,通过纠缠纯化和量子多址中继,仍然可以完成量子态的无线传输,并且其传输时延与所经过的链路距离和基站数目无关;因此,从数据传输时延的观点来看,该方案是最优的. 本研究对于构建大规模量子移动通信网具有一定的奠基作用.

关键词:陆地量子移动通信;纠缠纯化;量子纠缠多址中继;量子隐形传态

中图分类号:

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0774

0 引言

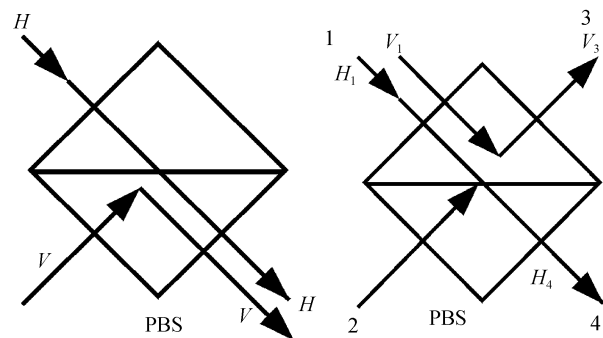
多址技术是移动通信的关键技术之一:第一代陆地移动通信系统采用频分多址(Frequency Division Multiple Addressing, FDMA)技术,系统容量小,移动终端仅能够支持语音业务;第二代移动通信系统采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术,系统容量扩大,移动终端功能增强,可支持语音和低速数据业务;第三代陆地移动通信系统(WCDMA, TD-SCDMA, CDMA2000)广泛采用码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)技术,大幅度提高了系统容量,可支持各种移动多媒体业务,实现无缝覆盖. 然而,根据量子态叠加原理和量子态不可克隆定理^[1-3],一旦量子计算机投入使用,传统的加密体制将无密可保^[4]. 量子密码、量子计算和量子通信技术的发展,使得传统的陆地移动通信网的信息安全正面临极大的威胁^[5-7]. 因此,将量子信息的安全性与移动通信系统的多址技术^[8]相结合,构造安全保密的新一代量子移动通信系统是当务之急.

实现量子移动通信的关键是量子态远程传送和量子纠缠多址中继. 为此,不同用户之间需要共享量子纠缠^[3]. 然而,在无线信道中,量子传态面临很大的困难,因为 EPR 纠缠对通过大气空间很难

在通信终端之间进行分发^[5-7]. 这样,量子移动用户之间就不能及时建立纠缠. 因此,需要研究一种新的量子态传输机制^[8-10].

1 基于极化分束器的纠缠纯化方案

该方案的主要器件是极化分束器(Polarizing Beam Splitter, PBS). PBS 能够根据光子的极化特性,有选择地传输或反射光子,其原理如图 1.



(a) Transmit horizontal polarization photons, reflect vertical polarization photons
(b) Change $|V\rangle_1$ into $|V\rangle_3$, change $|H\rangle_1$ into $|H\rangle_4$ photons

图 1 极化分束器分束原理

Fig. 1 The principle of splitting in polarizing beam splitter

在图 1 中,将需要操作的量子比特(qubits)看作光子的极化态. 光子的水平极化态用 $|H\rangle$ 表示,垂直极化态用 $|V\rangle$ 表示. 为了分析方便,通常将 $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 分别用 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示. 过程为:

基金项目:国家自然科学基金(No. 61072067)、陕西省自然科学基金计划(No. 2010JM8021)、陕西省教育厅自然科学基金项目(No. 2010JK834)和西安邮电学院青年教师科研基金(No. ZL2010-05)资助

第一作者:聂敏(1964-),男,教授,主要研究方向为量子通信、移动通信、现代通信网理论和关键技术. Email: mnice@xidian.edu.cn

通讯作者:姜劲雅(1986-),女,硕士研究生,主要研究方向为量子通信、移动通信、现代通信网理论和关键技术. Email: jinyajiang@gmail.com

收稿日期:2010-12-27; **修回日期:**2011-02-01

1) PBS 传输水平极化光子, 反射垂直极化光子. 例如, 垂直极化光子沿方向 1 入射, 用 $|V\rangle_1$ 表示, 沿方向 3 射出, 即通过 PBS 的作用, $|V\rangle_1$ 态被转化为 $|V\rangle_3$ 态. 类似地, $|H\rangle_1$ 变为 $|H\rangle_4$, $|H\rangle_2$ 变为 $|H\rangle_3$, $|V\rangle_2$ 变为 $|V\rangle_4$.

2) 现在考虑两个光子同时入射的情况, 每个光子的入射模式, 具有相同的极化. 即顶端以状态 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ 或底部 $|V\rangle_1|V\rangle_2$ 入射, 它们将总是沿着不同的方向射出, 所以两种输出模式中各自总有一个光子存在.

3) 如果两个入射的光子具有相反的极化, 即一个水平 H 极化, 另一个垂直 V 极化, 则它们将总沿相同的方向出射, 所以, 在两种出射之一总有两个光子, 而在另一个方向没有光子出射.

在图 1(a) 中, 两个光子或者都被传输, 或者都被反射. 这意味着以每一个输出模式发现一个光子, 相当于跨越子空间 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ 和 $|V\rangle_1|V\rangle_2$ 发射一个光子. 最后, 出现的光子将不能以基 H/V 测量, 但是, 这样就会有 $|H\rangle_1|H\rangle_2$ 和 $|V\rangle_1|V\rangle_2$ 叠加的结果.

图 2 是基于 PBS 的纠缠纯化方案. 假设 Alice 和 Bob 在式 (1) 的最大纠缠态下共享光子对

$$|\varphi^+\rangle_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_a |H\rangle_b + |V\rangle_a |V\rangle_b) \quad (1)$$

式中 a 和 b 分别表示 Alice 和 Bob 处的光子. 再假设纯化之前 Alice 和 Bob 共享的光子对处于式 (2) 的混合态

$$\rho_{ab} = F|\varphi^+\rangle_{ab}\langle\varphi^+| + (1-F)|\psi^+\rangle_{ab}\langle\psi^+| \quad (2)$$

式中

$$|\psi^+\rangle_{ab} = \frac{1}{2} (|H\rangle_a |V\rangle_b + |V\rangle_a |H\rangle_b) \quad (3)$$

即存在一种不希望出现的混合态 $|\psi^+\rangle_{ab}$. 那么在态 $|\varphi^+\rangle_{ab}$ 中两个光子具有相同的极化, 而在态 $|\psi^+\rangle_{ab}$ 中, 在 H/V 基下他们具有相反的极化.

在图 2 中, 纯化方案的本质环节是有四种空间输出模式, 而且必须在其中要精确地选择一个光

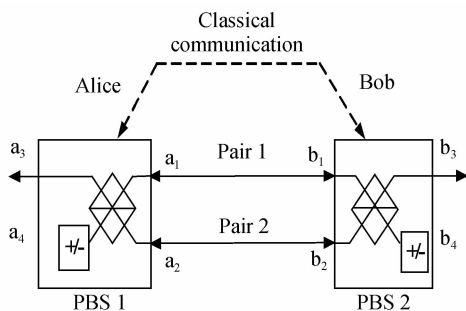


图 2 基于 PBS 的纠缠纯化方案
Fig. 2 Entanglement purification protocol based on PBS

子. 根据式 (2), 两个光子对的初态看作四个纯态的概率混合, 即光子对 1 和 2 以概率 F^2 处于状态

$$|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2} \quad (4)$$

以相等的概率 $F(1-F)$ 处于状态

$$|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2}, \quad |\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2} \quad (5)$$

以概率 $(1-F)^2$ 处于状态

$$|\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2} \quad (6)$$

交叉组合 $|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 和 $|\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 不会导致四种模式的情况, 这是因为两个纠缠的光子在态 $|\varphi^+\rangle_{ab}$ 上具有相同的极化, 而它们在态 $|\psi^+\rangle_{ab}$ 上具有相反的极化. 因此, 如果 Alice 处的极化相同, 则 Bob 处的极化必须相反, 反之亦然. 这样, 通过选择四种模式的情况, 就可以消除交叉项的影响.

考虑两个剩余项的组合, $|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 和 $|\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2}$. 首先考虑 $|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 的情况. 在图 2 中, 不管在任何时间, 只要在每一种输出模式中精确地存在一个光子, Alice 和 Bob 将会得到状态 $|\varphi^+\rangle_{a_3 b_3}$, 也就是说, 有 50% 的概率. 在 $|\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 情况下, 根据同样的方法, Alice 和 Bob 将把剩余的两个光子 a_3 和 b_3 以 50% 的概率投射到状态 $|\psi^+\rangle_{a_3 b_3}$.

因为 $|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 和 $|\psi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\psi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 的概率分别是 F^2 和 $(1-F)^2$, 在完成纯化过程之后, Alice 和 Bob 将以概率 $F^2/2$ 获得状态 $|\varphi^+\rangle_{a_3 b_3}$, 以概率 $(1-F)^2/2$ 获得状态 $|\psi^+\rangle_{a_3 b_3}$. 通过以上纯化过程, 就可以产生新的系宗, 通过密度算子描述为

$$\rho'_{ab} = F'|\varphi^+\rangle_{ab}\langle\varphi^+| + (1-F')|\psi^+\rangle_{ab}\langle\psi^+| \quad (7)$$

与纯化前相比, 对于 $F > 1/2$ 的期望状态 $|\varphi^+\rangle_{ab}$, 占有更多的部分

$$F' = \frac{F^2}{F^2 + (1-F)^2}, \quad F' > F \quad (8)$$

由此可见, 通过上述过程, 就可以实现量子纠缠的纯化.

为了更深入分析该方案, 假设最初的两对光子处于 $|\varphi^+\rangle$ 态, 它出现的概率为 F^2 . 对于 $|\varphi^+\rangle_{a_1 b_1} \cdot |\varphi^+\rangle_{a_2 b_2}$ 态, 仅考虑在 a_1 和 b_1 出现式 (9) 的状态

$$\frac{1}{2} (|H\rangle_{a_3} |H\rangle_{a_4} |H\rangle_{b_3} |H\rangle_{b_4} + |V\rangle_{a_3} |V\rangle_{a_4} |V\rangle_{b_3} |V\rangle_{b_4}) \quad (9)$$

首先, Alice 和 Bob 共享两个纠缠对. 他们将自己的光子叠加在 PBS 上, 并选择每次只有一个光子输出的情况; 然后, Alice 和 Bob 在 a_4 和 b_4 以 45° 基完成极化测量, Alice 在 a_3 对光子执行特殊操

作;最后,在 a_3 和 b_3 处所保留的光子对将比最初的两对光子具有更高的纠缠度. 这说明四种模式的概率是 50%.

Alice 和 Bob 在 a_4 和 b_4 通过 $+/-$ 基完成极化测量,然后在四光子纠缠之外的 a_3 和 b_3 输出模式之间产生最大的两光子纠缠,并比较测量结果.

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle), |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle - |V\rangle) \quad (10)$$

如果在 a_4 和 b_4 的测量结果是相同的,即 $|+\rangle|+\rangle$ 或 $|-\rangle|-\rangle$,则在 a_3 和 b_3 所剩余的两光子在 $|\varphi^+\rangle_{a_3 b_3}$ 态的左侧;如果在 a_4 和 b_4 的测量结果是相反的,即 $|+\rangle|-\rangle$ 或 $|-\rangle|+\rangle$,则所剩余的两光子在 $|\varphi^-\rangle_{a_3 b_3}$ 态的左侧,而

$$|\varphi^-\rangle_{a_3 b_3} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_{a_3} |H\rangle_{b_3} - |V\rangle_{a_3} |V\rangle_{b_3}) \quad (11)$$

在第二种情况下, Alice 能够完成简单的局部相位反转操作,将其所剩余的光子由 $|\varphi^-\rangle_{a_3 b_3}$ 态变回 $|\varphi^+\rangle_{a_3 b_3}$ 态.

2 基于受控量子非门操作的纠缠纯化方案

图 3 是基于受控量子非门 (Controlled-NOT, CNOT) 操作的纠缠纯化方案. 其纯化过程为:

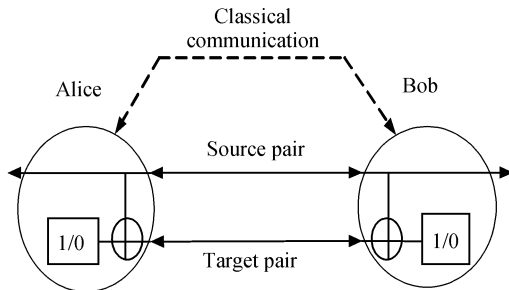


图 3 基于 CNOT 操作的纠缠纯化方案

Fig. 3 Entanglement purification protocol based on CNOT

1) 有一对具有较高纠缠度的光子对,将其中的一个光子发送给 Alice,另一个发送给 Bob. Alice 和 Bob 分别在自己的位置上对该两个光子完成 CNOT 操作;

2) Alice 和 Bob 通过计算基 (即 0/1 基) 测量属于目标纠缠对的光子,并通过经典信道比较测量结果. 如果这些结果相同,则剩余纠缠对比最初的纠缠对具有较高的纠缠度. 在这种情况下,他们选择纠缠度较高的纠缠对. 如果得到相反的结果,就丢弃它.

3) 通过重复 2) 的工作,就可从任意高的纠缠质量中提取纠缠度最高的纠缠对. 所期望的纠缠质量越高,所需要最初较低纠缠对的数目就越多.

3 两种纠缠纯化方案的比较

在上述两种纠缠纯化方案中,第一种方案主要通过极化分束器完成,第二种方案需要通过 CNOT 操作完成.

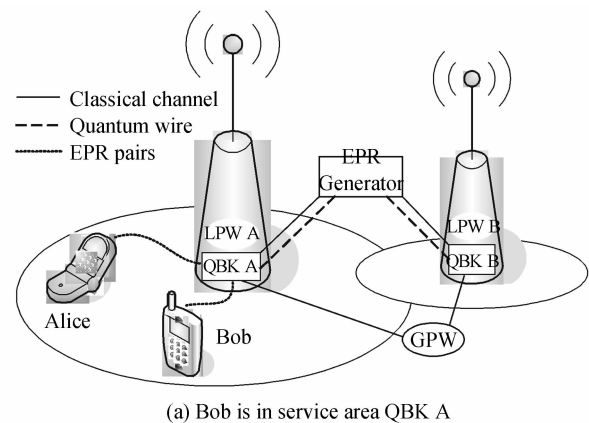
在第二种方案中,尽管目前一些量子逻辑门已经有了实验演示,如离子阱和高精密的微波腔,但是在远距离的量子通信中仍然没有可用于纠缠纯化的实用 CNOT 门. 另外,由 CNOT 操作导致的错误概率必须小于 5%,这个数值远远超出目前可以实现的范围. 最近所提出的通过线性光学 CNOT 操作实现纠缠纯化同样也超出了当前技术的可实现范围.

对于第一种方案而言,由于仅采用 PBS 这种简单的线性光学器件,而这种器件操作的精确度很高,纠缠纯化所必须的局域操作能够以所要求的精确性完成. 并且该方案所涉及的操作都是在目前技术所能够达到的范围之内,因此能够极大地简化远距离量子通信的实现和完成.

将量子通信的安全、保密、高效的特点与陆地移动通信的灵活性相结合,构建未来要实现的大规模陆地量子移动通信方案,在遥远的不同地点之间进行纠缠态的分发是十分关键的^[2]. 由于量子通信信道不可避免的存在噪声,随着传输距离的增加,纠缠粒子之间的纠缠度会越来越弱 (纠缠下降)^[3]. 纠缠纯化就是从弱化的纠缠对中获取高度纠缠态的关键技术^[4]. 所以,相比之下,第一种方案在目前的技术下操作容易,方便可行.

4 量子纠缠多址中继方案和移动通信网的分区服务模型

图 4 给出了量子纠缠多址中继方案和网络的分区服务模型. 设 Bob 是主叫移动用户,其位置有两种不同位置情况,一种是处于基站 A 的服务区内,



(a) Bob is in service area QBK A

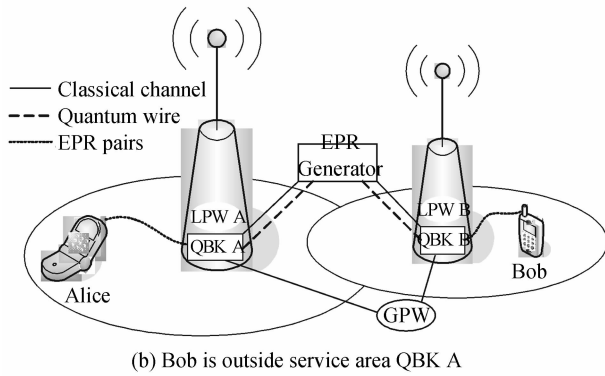


图4 量子纠缠多址中继方案和移动通信网分区服务模型
Fig. 4 The model of quantum entanglement multiple-access relay scheme and mobile telecommunication network services division

通过纠缠多址方式接入网络, 另一种是处于基站 A 的服务区以外, 通过纠缠中继方式接入网络。

在图 4 中, QBK 表示量子桥, 是无线接入点与固定网络之间的接口, 也是网络的纠缠态产生点和分点, 完成纠缠多址中继任务。各个 QBK 由几个无线收发信机(Radio Transceiver, RT)组成, RT 用于以无线电波的形式接收和发射经典数据。

QBK 的主要目的是管理 EPR 纠缠对, 而这些纠缠对是它自己与在其覆盖范围内的移动量子通信设备所共享的。当一个量子通信设备移动到另一个 QBK 的覆盖区域内时, 与以前的 QBK 共享的 EPR 纠缠对需要移交给新的 QBK, 完成纠缠中继。当一个处于覆盖范围内的无线量子通信设备发射或接收量子信息时, QBK 将起到中间节点的作用, 用于中继量子比特。

此外, 各 QBK 配备有区域数据库, 即局部位置数据库(Local Position Warehouse, LPW)。LPW 用来记录位于 QBK 覆盖区内的各无线量子通信设备的相关信息。LPW 还可用来确定一定的量子通信用户是否位于 QBK 覆盖区内。

除了 LPW 之外, 在核心网络中还有一个全局数据库, 称为全局位置数据库(Global Position Warehouse, GPW)。GPW 的主要目的是管理所有移动量子设备的位置信息。它记录了所有量子移动设备的当前位置。通过询问 GPW, 可以发现任何一部无线量子设备在哪个 QBK 的覆盖区。这样, 存储在 GPW 中的数据需要频繁地更新。换句话说, 只要移动量子设备从一个 QBK 的覆盖区移动到另一个 QBK 的覆盖区, GPW 中的数据就需要进行同步更新, 这样, 它才能保持所有量子移动设备的当前位置信息。

在网络的基础设施中, 还包括 EPR 发生器。EPR 发生器负责产生 EPR 纠缠对。一旦两个 QBK

需要为各自覆盖区内的设备建立量子信道, EPR 发生器将分发所产生的纠缠对。纠缠对的分发是通过量子信道进行的。EPR 发生器将一个量子比特发送给一个 QBK, 而将另一个量子比特发送给另一个 QBK。每一个移动量子设备都被指配给一个原籍 QBK, 这样, 各个移动量子设备最初共享了很多 EPR 纠缠对。

考虑陆地量子移动通信的具体情况, 其初始状态是: Alice 位于 QBK A 的覆盖区, 她需要将量子比特发送给 Bob。首先, Alice 先给 QBK A 发送一个请求, 即她需要将量子比特发送给 Bob 通报给 QBK A; 其次, QBK A 询问自己的 LPW, 以便检查 Bob 是否处于自己的服务区内。这可能出现以下两种情况: 情况 1: Bob 的位置处于 QBK A 的服务区内, 如图 4(a); 情况 2: Bob 的位置不在 QBK A 的服务区内, 如图 4(b)。

通过分析可知, 在本量子中继方案中, 即使通信的双方没有共享 EPR 纠缠对, 也能完成量子态的无线移动通信。由于量子比特是通过中间节点传送的, 传送时延与不同路由所经过的距离和无线节点数目的关系需要进一步研究。为此, 本文提出了 EPR 纠缠对多址中继方案。

5 EPR 纠缠对的量子多址中继原理

在该量子多址中继方案中, 每一个中间节点与其上行和下行节点共享 EPR 纠缠对, 可以认为各个中间节点的作用相当于 EPR 纠缠对发生器, 在其上行和下行节点之间相当于完成了量子中继的任务。从而可以得出 EPR 纠缠对的多址中继原理, 其精确性需要进行证明。

设信源(Alice)与中间节点(Candy)所共享的 EPR 纠缠对为

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_C + |1\rangle_A|1\rangle_C) \quad (12)$$

同样, 中间节点(Candy)与目的节点(Bob)所共享的 EPR 纠缠对为

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_C|0\rangle_B + |1\rangle_C|1\rangle_B) \quad (13)$$

这样, 整个四量子比特的系统可以表示为

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_C + |1\rangle_A|1\rangle_C) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_C|0\rangle_B + |1\rangle_C|1\rangle_B) \quad (14)$$

经过 CNOT 门操作后, 可以得到

$$[|0\rangle_A|0\rangle_C(|0\rangle_C|0\rangle_B + |1\rangle_C|1\rangle_B) + |1\rangle_A|1\rangle_C(|1\rangle_C|0\rangle_B + |0\rangle_C|1\rangle_B)] \quad (15)$$

经过 Hadamard 门操作, 得到

$$\frac{1}{2^{3/2}} [|0\rangle_A (|0\rangle_C + |1\rangle_C) (|0\rangle_C |0\rangle_B + |1\rangle_C |1\rangle_B) + |1\rangle_A (|0\rangle_C - |1\rangle_C) (|1\rangle_C |0\rangle_B + |0\rangle_C |1\rangle_B)] \quad (16)$$

式(16)可以重新写为

$$\frac{1}{2^{3/2}} [|00\rangle_C (|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B) + |01\rangle_C (|0\rangle_A |1\rangle_B + |1\rangle_A |0\rangle_B) + |10\rangle_C (|0\rangle_A |0\rangle_B - |1\rangle_A |1\rangle_B) + |11\rangle_C (|0\rangle_A |1\rangle_B - |1\rangle_A |0\rangle_B)] \quad (17)$$

可以看出, 整个系统由四部分组成, 各部分取决于中间节点 Candy 所拥有的两个量子比特的状态. 因此, 只要中间节点测量其所拥有的两个量子比特的状态, 就能够在源与目的节点之间建立起四项纠缠的量子比特. 例如, 假设 Candy 的测量输出状态为 $|00\rangle$, 则纠缠的量子比特必须处于式(18)的状态

$$2^{-1/2} (|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B) \quad (18)$$

而这与中间节点所期望建立的量子状态完全一样. 另一方面, 如果 Candy 的测量结果为状态 $|01\rangle$, 则纠缠的量子比特必须处于式(19)的状态

$$2^{-1/2} (|0\rangle_A |1\rangle_B + |1\rangle_A |0\rangle_B) \quad (19)$$

目的节点所拥有的有关纠缠的量子比特状态的信息, 取决于中间节点的测量结果. 因此, 不经过 X 门, Z 门或 X 门和 Z 门的操作, 它就可以给 EPR 纠缠对安排纠缠的量子比特, 然后在源与目的节点之间建立起 EPR 纠缠对.

由于建立 EPR 纠缠对的量子电路是量子态传送电路的扩展, 这说明即使该量子比特与其它量子比特是纠缠的, 量子态传送也能够将量子比特传送给遥远的量子设备. 因此, EPR 纠缠对的多址中继方案也可以被认为是量子比特的传输, 该量子比特与 Alice 的量子比特是纠缠的, 通过中间节点, 传送给 Bob. 由此可见, EPR 纠缠对多址中继的时间复杂性与中间节点的数量无关. 因为所有的中间节点同时并行完成了 EPR 纠缠对的桥接.

可以看出, 上述多址中继方案能够通过多个中间节点确定路由. 在该方案中, 量子路由机制中的量子电路可以进行并行处理. 因此, 其运行时间必然等于量子态的传输时间, 其传输时延与链路的无线跳数无关. 换句话说, 量子多址中继的数据速率等于量子态的传输速率. 因此, 在数据传输速率方面, 即使在源与目的节点之间没有共享 EPR 纠缠对的情况下, 该量子多址中继方案也是最优的.

6 结论

本文提出了一种新的陆地量子移动通信网络的量子纠缠多址中继方案和分区服务模型, 分析比较

了基于量子受控非门(CONT)和极化分束器(PBS)的两种纠缠纯化方法. 该方案能够将量子通信的安全保密性与移动通信的灵活性相结合, 构建未来大规模陆地量子移动通信系统, 解决由于量子信道存在噪声, 使得由于传输距离的增加而导致纠缠度下降的问题. 分析结果表明, 即使在量子移动终端之间没有共享 EPR 纠缠对的情况下, 通过纠缠纯化和量子多址中继, 仍然可以完成量子态的无线传输, 并且其传输时延与所经过的链路距离和基站数目无关, 因此, 从数据传输时延的观点来看, 该方案是最优的.

参考文献

- [1] ZHAO Z, CHEN Y A, ZHANG A N, *et al.* Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation[J]. *Nature*, 2004, **430**: 54-58.
- [2] ZHU Chong-hua, PEI Chang-xing, QUAN Dong-xiao, *et al.* Adaptive continuous variable quantum key distribution based on channel estimation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2184-2188.
朱畅华, 裴昌幸, 权东晓, 等. 基于信道估计的自适应连续变量量子密钥分发方法[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2184-2188.
- [3] QUAN Dong-xiao, PEI Chang-xing, LIU Dan, *et al.* One-way deterministic secure quantum communication protocol based on single photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2493-2497.
权东晓, 裴昌幸, 刘丹, 等. 基于单光子的单向量子安全通信协议[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2493-2497.
- [4] PAN J W, SIMON C, BRUKNER C, *et al.* Entanglement purification for quantum communication[J]. *Nature*, 2001, **410**: 1067-1070.
- [5] QUAN Dong-xiao, PEI Chang-xing, ZHU Chang-hua, *et al.* New method of decoy state quantum key distribution with a heralded single-photon source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5600-5604.
权东晓, 裴昌幸, 朱畅华, 等. 一种新的预报单光子源诱骗态量子密钥分发方案[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5600-5604.
- [6] ZHANG Tian-peng, NIE Min, PEI Chang-xing. Research on multi-particle entangled QTDM communication scheme and QMU protocol[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 987-991.
张天鹏, 聂敏, 裴昌幸. 多粒子纠缠态 QTDM 通信方案及 QMU 协议[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 987-991.
- [7] LIU D, PEI C X, QUAN D X, *et al.* A new quantum secure direct communication scheme with authentication[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(5): 306-308.
- [8] ZHU C H, PEI C X, QUAN D X, *et al.* A new quantum key distribution scheme based on frequency and time coding[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(9): 301-304.
- [9] ZHA Xin-wei, ZHANG Wei. Perfect teleportation an arbitrary three-particle state [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 979-982.
查新未, 张炜. 三粒子任意态的量子隐形完全传送[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 979-982.
- [10] LI De-chao, SHI Zhong-ke. The probabilistic teleportation via bi-particle mixed state[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 983-986.
李得超, 史忠科. 基于混合纠缠态的概率隐形传态[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 983-986.

A Novel Optimum Quantum States Entanglement Multiplexing and Relay Scheme for Land Quantum Mobile Communication

NIE Min, JIANG Jin-ya, LIU Xiao-hui

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

Abstract: A novel service model of land quantum mobile communication systems and the scheme of quantum multiplexing relay were proposed. The two quantum entanglement purification method, one is based on the quantum controlled-not gate, the other is based on polarizing beam splitter, were compared then. Theoretical analysis results show that the proposed scheme can transmit quanta states with no EPR pairs shared by source and objective nodes, and the time delay in transmission has nothing to do with the number of wireless hopping and the distance of link.

Key words: Land quantum mobile communication; Entanglement purification; Quantum entanglement multiplexing relay; Quantum teleportation