



一种全新的基于纠缠交换的量子中继策略

许敏¹, 聂敏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, 陕西 西安 710061;

2. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

3. 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: 利用纠缠作为资源的量子通信协议具有安全性好、可靠性高、使用灵活等优势, 具有广阔的发展前景, 同时也对纠缠光子的保真度提出了一定的要求。提出了一种基于纠缠交换的量子中继策略, 在远距离通信者之间设置多级中继, 借助经典通信的辅助作用, 通过节点间的纠缠交换和纠缠纯化操作为收发双方提供保真度稳定的长程纠缠连接。性能分析表明, 通过合理控制中继级数和提高纠缠交换以及纠缠纯化的成功率, 可以显著降低系统时延和提高系统吞吐量, 为实现全球量子通信提供必不可少的纠缠资源。

关键词: 量子通信; 纠缠交换; 中继

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016061

A brand new strategy of quantum relay strategy based on entanglement swapping

XU Min¹, NIE Min¹, YANG Guang^{1,2}, PEI Changxing³

1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710061, 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

Abstract: Quantum protocols based on entanglement are known as information security, reliability, flexibility and a broad prospect in use. Meanwhile, the fidelity of photons is also required. A new quantum relay strategy was proposed. By setting multi-relays between distant correspondents and under the assistance of classical communications, the strategy can execute entanglement swapping and entanglement purification to provide the correspondents with remote entanglement connection of stable fidelity. Performance analysis shows that by reasonable control of relay series, improvement of entanglement swapping and entanglement purification, the time delay and throughput can be significantly improved, necessary entanglement resources can be provided for the global quantum communication.

Key words: quantum communication, entanglement swapping, relay

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61172071, No. 61201194); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目 (No. 2014JQ8318); 陕西省国际科技合作与交流计划基金资助项目 (No. 2015KW-013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61172071, No. 61201194), The Natural Science Research Foundation of Shaanxi Province (No. 2014JQ8318), International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Program of Shaanxi Province (No. 2015KW-013)

1 引言

在量子通信网中,信息以量子态的形式编码、传输和处理。基于量子力学的非定域性、叠加原理和不可克隆定理等^[1],在通信距离、容量、安全上具有与传统通信截然不同的原理和优势。其中,纠缠是一种独特的量子资源,是量子非定域性最直接的体现,通信双方一旦建立了纠缠连接,就可以借助纠缠关联进行量子密钥分发、量子秘密共享、量子安全直接通信^[2-6]等各种通信协议。因此,研究如何通过量子中继建立远距离的纠缠连接具有重要的现实意义。经典通信通过能量的变化来实现编码,这种方式使得信息比特和信号传输特性紧密结合在一起,利用中继技术恢复信号的能量不仅可以恢复信号的传输特性,同时也对表示信息的比特进行了恢复,因此,经典通信的中继技术只需要对信号能量进行补偿即可实现中继,且经典意义上的能量参数易于测量和控制。相对来说,经典通信中的中继技术较易实现^[7]。与经典通信不同,量子信息的载体——量子态具有量子特性,传输和最终检测的核心部分不是能量而是信号的状态,由于测不准原理和测量塌缩等原理的限制,对量子态进行测量恢复会导致携带信息的量子状态遭受不可逆转的破坏,造成信息丢失,使得量子通信不能正常进行。因此,通过中继分发纠缠资源而不是对量子信号态直接进行识别和逐级恢复不失为一种高效灵活的方法^[8-12]。此外,量子中继节点并不需要对携带信息的量子信号本身进行操作,传输的信息安全可以得到进一步的提高。参考文献[13]提出了第一个影响广泛的量子中继方案,将宏观尺度的原子系统作为量子存储器,通过拉曼散射过程建立原子系统与光子之间的纠缠,基于单光子测量实现节点间的纠缠交换,利用相对简单的物理系统达到了实现量子中继器的基本要求,对随后的量子中继技术的研究和发展有着重要的影响。参考文献[10]提出了一种基于纠缠态的量子中继通信系统,采用依次在每个中继节点处进行纠缠交换和纠缠纯化的中继策略,可以实现远距离下经多个中继节点的量子通信。然而,中继级数较高时,这种方法的效率会受到影响,本文在上述研究的基础上进行研究和改进,借助量子门操作和量子测量实现纠缠交换,简单易行,并且可以有多个节点同时进行纠缠交换和纠缠纯化,节省了纠缠交换和经典信息传输的时延,提高了系统性能。

2 量子中继系统模型及纠缠交换原理

2.1 纠缠中继系统模型

远距离终端间的通信会受制于连接收发双方的链路长度,以光纤信道为例,光子的传输损耗和退极化概率随光纤长度指数增长,造成传输量子态的保真度随光纤长度指数下降,纠缠纯化及其相关操作可以在一定程度上对保真度进行恢复,然而随着通信距离的增长,保真度会下降到纠缠纯化要求的最低阈值之下,导致纯化策略的失效。此外,非理想的量子操作也会进一步限制纠缠纯化的效率。因此,可以考虑将长度为 L 的链路分段,每隔长度 l 设置一个量子中继器。其中, L 远大于直接分发纠缠光子保真度满足纯化门限值和通信需要规定的最小距离。用户到中继以及中继之间的链路长度为 l ,在此距离上,纠缠光子可以成功进行纠缠纯化从而满足通信需求。建立如图1所示的量子中继系统模型。

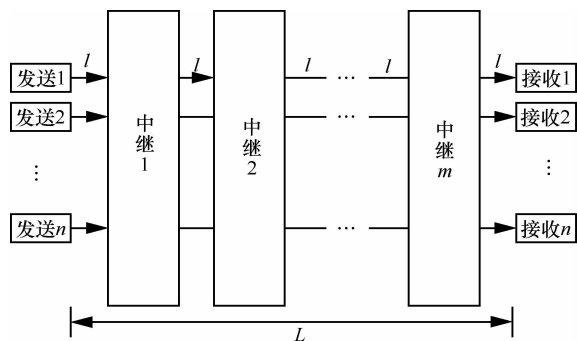


图1 量子中继系统模型

将中继器视为中间节点,将通信双方视为边缘节点,则相邻节点保持纠缠连接,一旦有通信需求发生,中间节点就会根据目的地址和源地址在对应的边缘节点间建立纠缠连接,而后续通信双方并不需要关心纠缠建立的具体物理细节。

2.2 相邻节点间的纠缠交换原理

如图2所示,可以看作只有一个中继器的简单系统,虚线框内的部分可视为一个中继器,Alice和Bob为通信双方,虚线框内的中继器由一个Bell态测量装置和两个EPR纠缠源组成。当Alice和Bob间发生通信时,首先由两个EPR纠缠源同时向Alice(Bob)和BSM发送纠缠纠缠粒子对 $a_1-a_2(b_1-b_2)$,此时,粒子 a_1 和 a_2 、粒子 b_1 和 b_2 处于特定的Bell态,4个Bell态可以构成一组完备正交基,分别为:



$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |1\rangle) \quad (1)$$

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |0\rangle - |1\rangle \otimes |1\rangle) \quad (2)$$

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |1\rangle + |1\rangle \otimes |0\rangle) \quad (3)$$

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |1\rangle - |1\rangle \otimes |0\rangle) \quad (4)$$

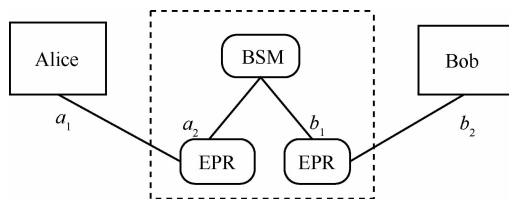


图2 相邻节点纠缠交换原理

此时, a_2 和 b_1 是相互独立的粒子, 假设粒子 $a_1 a_2, b_1 b_2$ 的初始状态分别为:

$$|\psi^+\rangle_{a_1 a_2} = \frac{|01\rangle_{a_1 a_2} + |10\rangle_{a_1 a_2}}{\sqrt{2}}, |\psi^+\rangle_{b_1 b_2} = \frac{|01\rangle_{b_1 b_2} + |10\rangle_{b_1 b_2}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

则系统的初始状态为:

$$|\psi_0\rangle = |\psi^+\rangle_{a_1 a_2} \otimes |\psi^+\rangle_{b_1 b_2} = \frac{1}{2} [|0101\rangle + |0110\rangle + |1001\rangle + |1010\rangle]_{a_1 a_2 b_1 b_2} \quad (6)$$

BSM 测量装置的内部线路如图3所示。

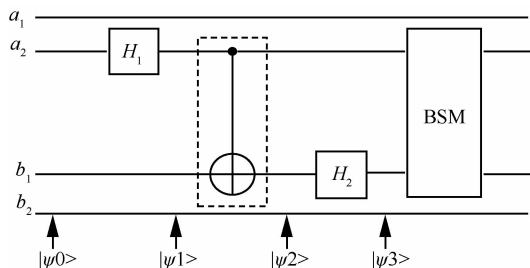


图3 BSM 测量装置内部线路

进行纠缠交换的对应操作过程如下。

(1) 将粒子 a_2 通过第一个 hadamard 门 H_1 , 系统状态变为:

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} [|0001\rangle - |0111\rangle + |0010\rangle - |0100\rangle + |1001\rangle + |1111\rangle + |1010\rangle + |1100\rangle]_{a_1 a_2 b_1 b_2} \quad (7)$$

(2) 以 a_2 作为控制比特对粒子 b_1 进行受控非操作, 系统状态变为:

$$|\psi_2\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} [|0001\rangle - |0111\rangle + |0010\rangle - |0100\rangle + |1001\rangle + |1111\rangle + |1010\rangle + |1100\rangle]_{a_1 a_2 b_1 b_2} \quad (8)$$

(3) 将 b_2 通过第二个 hadamard 门 H_2 , 系统状态变为:

$$\begin{aligned} |\psi_3\rangle = & \frac{1}{4} [|0001\rangle + |0011\rangle - |0101\rangle + |0111\rangle + |0000\rangle - |0010\rangle - |0100\rangle - |0110\rangle + |1001\rangle + |1011\rangle + |1101\rangle - |1111\rangle + |1000\rangle - |1010\rangle + |1100\rangle + |1110\rangle]_{a_1 a_2 b_1 b_2} \\ & \frac{1}{2} \left[\left(\frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_2 b_1} \otimes \left(\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_1 b_2} + \left(\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_2 b_1} \otimes \left(\frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_1 b_2} + \left(\frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_2 b_1} \otimes \left(\frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_1 b_2} + \left(\frac{|11\rangle - |00\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_2 b_1} \otimes \left(\frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \right)_{a_1 b_2} \right] \\ & = \frac{1}{2} [|\psi^+\rangle_{a_2 b_1} \otimes |\phi^+\rangle_{a_1 b_2} + |\phi^+\rangle_{a_2 b_1} \otimes |\phi^-\rangle_{a_1 b_2} + |\psi^-\rangle_{a_2 b_1} \otimes |\psi^-\rangle_{a_1 b_2} - |\phi^-\rangle_{a_2 b_1} \otimes |\psi^+\rangle_{a_1 b_2}] \quad (9) \end{aligned}$$

(4) 对 a_2 和 b_1 进行联合 Bell 态测量, a_2 和 b_1 会塌缩到 4 个 Bell 态之一, 在原本互相独立的 a_1 和 b_2 之间建立了纠缠连接, 由式(9)可得, 当测量结果为 $|\psi^+\rangle, |\psi^-\rangle, |\phi^+\rangle$ 和 $|\phi^-\rangle$ 时, 的状态分别为 $|\phi^+\rangle, |\psi^-\rangle, |\phi^-\rangle$ 和 $|\psi^+\rangle$, 得到每种状态的概率均为 $\frac{1}{4}$ 。

3 中继流程纠缠交换系统方案

本节将以一个由 3 个中继器、4 个用户组成的系统为例, 给出经多次中继建立纠缠链路的流程控制策略。如图4所示, 链路有 3 个中继器 A、B、C 和 4 个接入用户。其中, Alice 和 Charlie 分别接入中继器 A 的 1 和 3 端口; Bob 和 Danny 分别接入中继器 C 的 2 和 4 端口, 端口之间通过 2x2 的光开关切换。图4中虚线表示经典通信线路, 用来完成量子操作控制、传输测量结果以及光开关切换等功能。为方便分析, 将 X 中继的 y 端口命名为 X_y ; 分发到 X 中继 z 端口的粒子命名为 x_z ; 分发给用户 User 的粒子命名为 U。在 Alice 和 Bob 间的中继步骤如图4所示。

(1) 纠缠分发: Alice 发出通信请求, 控制系统根据目的地址确定经过的中继器序列及 Bob 所在的端口号, 在 A_1 端

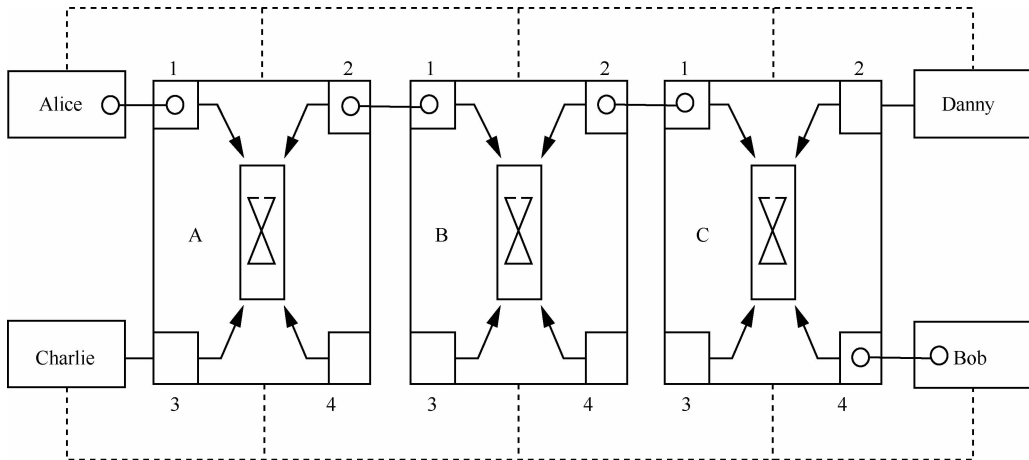


图4 纠缠中继示意

口和 Alice、 B_1 端口和 A_2 端口、 C_1 端口和 B_2 端口、 C_4 端口和 Bob 之间制备并分发纠缠光子对。执行纠缠交换的光路分别切换到 A_1-A_2 、 B_1-B_2 、 C_1-C_4 。假设分发的纠缠光子均处于最大纠缠态 $|\psi^+\rangle$ ，则系统状态为 $|\Psi\rangle = |\psi^+\rangle_{Aa_1} \otimes |\psi^+\rangle_{a_2b_1} \otimes |\psi^+\rangle_{b_2c_1} \otimes |\psi^+\rangle_{c_4B}$ 。

(2) 信道的退相干作用会造成纠缠光子保真度下降，当保真度低于通信门限时，就不能保证信息传输的准确性和完整性，因此需要对分发的纠缠光子进行纠缠纯化。

(3) 同时在 A_1 端口和 A_2 端口之间，在 C_1 端口和 C_4 端口之间实施纠缠交换。纠缠交换步骤中进行 Bell 态测量时产生相应的纠缠分解和塌缩，塌缩到每种状态的概率是完全相等的，为方便分析，假设每个中继处的测量结果均为 $|\psi^+\rangle$ ，则对应的粒子状态塌缩到 $|\phi^+\rangle$ ，则此时系统状态为 $|\Psi\rangle = |\phi^+\rangle_{Ab_1} \otimes |\psi^+\rangle_{a_1a_2} \otimes |\psi^+\rangle_{c_1c_4} \otimes |\phi^+\rangle_{b_2B}$ 。

(4) 量子操作会对纠缠保真度造成损伤，因此在 Alice 和 B_1 、 B_2 端口和 Bob 之间进行纠缠纯化。

(5) 在 B_1 端口和 B_2 端口之间执行纠缠交换，此时系统状态为 $|\Psi\rangle = |\phi^+\rangle_{AB} \otimes |\psi^+\rangle_{a_1a_2} \otimes |\psi^+\rangle_{b_1b_2} \otimes |\psi^+\rangle_{c_1c_4}$ 。

(6) 在 Alice 和 Bob 之间进行纠缠纯化。至此，Alice 和 Bob 之间的纠缠光子处于最大纠缠态 $|\phi^+\rangle_{AB}$ 。纠缠中继完成。

4 系统性能分析

设待纯化的粒子密度矩阵为：

$$\hat{\rho} = F|\phi^+\rangle\langle\phi^+| + \frac{1-F}{3} [|\psi^+\rangle\langle\psi^+| + |\psi^-\rangle\langle\psi^-| + |\phi^-\rangle\langle\phi^-|] \quad (10)$$

其中， F 表示保真度。纠缠交换步骤后，粒子保真度变为：

$$F' = \frac{1}{4} \left[1 + 3p_1^2 p_2 \frac{4\eta^2 - 1}{3} \left(\frac{4F - 1}{3} \right)^2 \right] \quad (11)$$

其中，参数 p_1 、 p_2 和 η 分别为链路进行单比特量子操作、两比特量子操作和量子测量的成功率。

经过一次纯化后保真度变为：

$$F'' = \frac{F'^2 + \frac{1}{9}(1-F')^2}{F'^2 + \frac{2}{3}F'(1-F') + \frac{5}{9}(1-F')^2} \quad (12)$$

采用停等式 ARQ 协议传输经典辅助信息，其误帧率为 p 。设中继级数为 n ，参数 i 满足 $2^i \leq n < 2^{i+1}$ ，令系统每轮进行纠缠分发、纠缠交换、纠缠纯化的成功率 p_{em} 、 p_{es} 、 p_{pc} 相互独立且服从指数分布，则中继过程的经典信息传输时延为：

$$T_c = \frac{1+p}{1-p} \tau_{tr} \left[\frac{2^{i+1}-1}{p_{es}} + \frac{t(2^{i+1}+n-1)}{p_{pc}} \right] \quad (13)$$

其中， $\tau_{tr} = l/c$ ， l 表示中继间距， c 表示光速。

令 τ_{em} 表示纠缠分发时延， τ_{op} 表示一次量子操作的平均时间， t 表示纯化到保真度阈值的次数。则中继总时延为：

$$T = \tau_{em} / p_{em} + \left[4(i+1)\tau_{op} + \frac{(1+p)(2^{i+1}-1)}{1-p} \tau_{tr} \right] / p_{es} + \left[3t(i+1)\tau_{op} + \frac{t(1+p)(2^{i+1}+n-1)}{1-p} \tau_{tr} \right] / p_{pc} \quad (14)$$

令 $P = p_{em}(p_{es} p_{pc})^{i+1}$ ，则系统吞吐量为：



$$S=1/(T/P) \quad (15)$$

为了进行定量分析,取 $\tau_{\text{em}}=0.3 \mu\text{s}$, $\tau_{\text{q}}=2 \mu\text{s}$ 。进行纠缠中继的复杂度与满足 $2^i \leq n < 2^{i+1}$ 的参数 i 相关,如图 5 所示,总体看来,系统时延随中继级数的增加上升,吞吐量随之下降,本策略下的时延和吞吐量均优于原方案,且级数越高,效果越明显。当保真度较高时,经过纠缠交换后保真度下降较少,因此纯化恢复的次数较少,高保真度下纯化效率也更高,系统耗费在纠缠纯化上的时间会小于保真度较低的情况。中继系统的时延随的增加指数上升,吞吐量随之下降。在给定 i 的情况下,区间内的时延和吞吐量与中继级数呈线性变化关系,图 5(b)和图 5(d)中,给定了中继级数 n 满足 $i=3$,此时,由于中继级数较高,时延主要来自于中继间执行纠缠交换以及纠缠纯化。

量子门操作和量子测量过程均离不开经典信息的辅助,中继过程中的经典信息传输十分频繁,采用合理有效的经典辅助通信能有效提高系统性能。此外,控制中继间距也会对系统性能产生影响,当中继间距较大时,中继级数会显著减小,控制流程也会相对简单,然而由于信道的退相干作用会导致纠缠分发的成功率降低,纯化的次数增加,若间距设置过大,尤其是当信道不理想时,保真度的衰减甚至可能超过纠缠纯化的能力,致使流程开始时进行的

纠缠分发始终无法完成。

由于中继间的距离可以根据信道性能良好程度灵活设置,且纠缠分发只在纠缠交换步骤开始前进行,对系统性能造成主要影响的是纠缠交换和纠缠纯化的成功率,这两种操作的不理想特性主要是因为量子门变换和量子测量往往是不理想的。纠缠交换过程中,需要用到两个单比特量子门、一个两比特量子门和一次两比特量子测量,纠缠交换和纯化的成功率很大部分取决于设备进行量子门操作和量子操作的成功率。量子门操作和测量越可靠,纠缠交换的成功率就越高,进行纠缠交换的平均次数越少,经典信息传输的时延越短,尤其是中继级数较高时。在中继过程接近完成的阶段,经典通信发生在远距离节点间,若是由于量子门操作和测量导致纠缠交换失败,则需要远距离下进行经典通信重新传输控制信令和测量结果,导致时延上升。如图 6 所示,令 $p_1=p_2=p$ 为量子操作的成功率, η 为量子测量的成功率,可以看出,保真度较高的情况下执行量子操作和测量的成功率均高于低保真度的情况。

5 结束语

本文提出了一种全新的基于纠缠交换的量子中继策

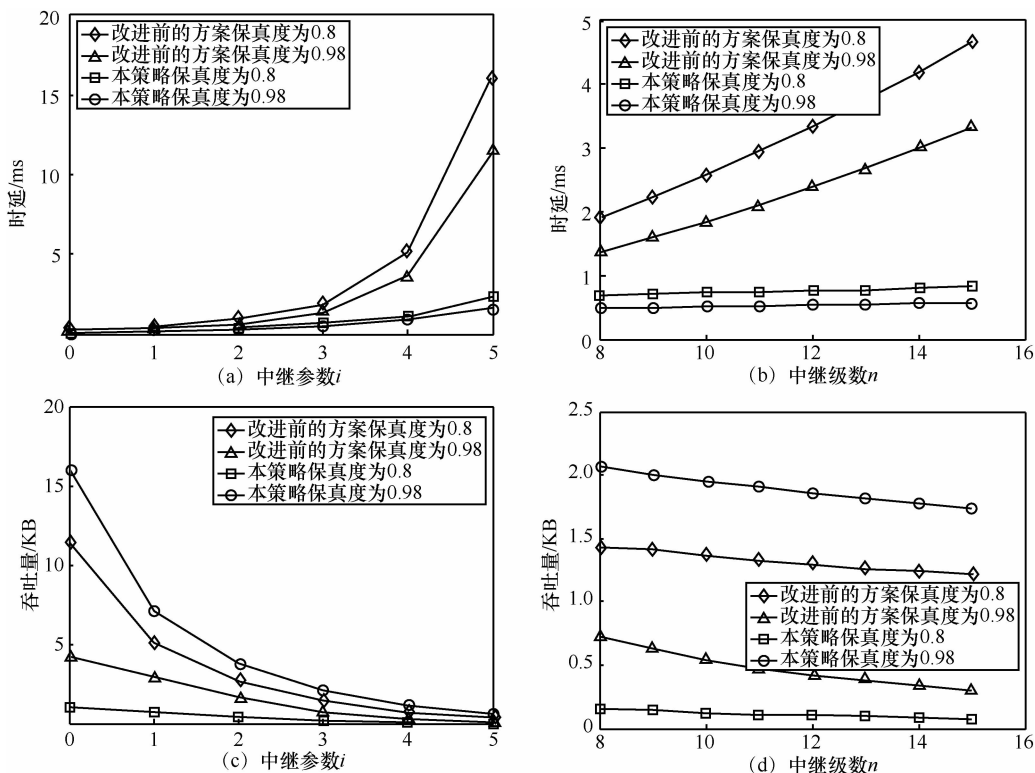
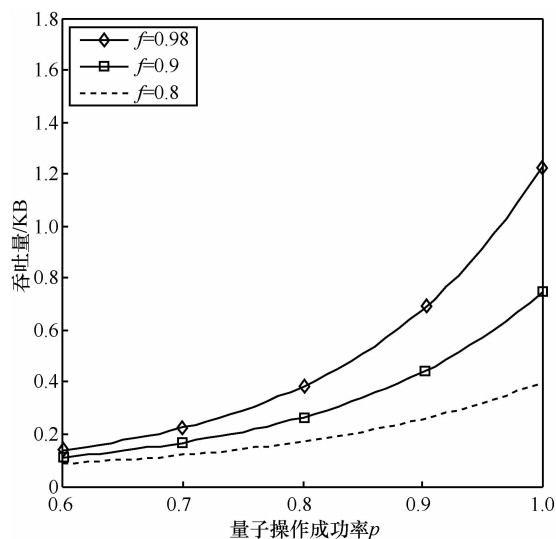
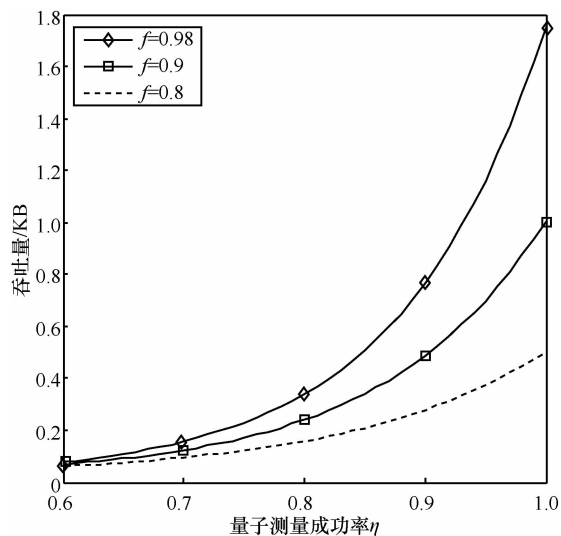


图 5 系统时延 T 及吞吐量 S 随中继参数 i 和中继级数 n 的变化情况

(a) 吞吐量 S 与量子操作成功率 p (b) 系统吞吐量 S 与量子测量成功率 η 图6 系统吞吐量 S 随量子操作成功率 p 和测量成功率 η 的变化情况

略,通过多次中继辅助,可以得到远距离的高纠缠度纠缠光子对,为后续用户实施的基于纠缠的密钥分发、量子秘密共享、量子安全直接通信等协议提供了纠缠资源,使不同距离的用户都能得到保真度一致的纠缠光子,稳定了通信系统的性能。

通过不断提高量子操作和测量设备的稳定性以及采用各种更为高效的纯化策略,中继系统的性能会得到进一步提高,这种中继方式可有效提高量子通信的覆盖范围,对未来构建全球性量子通信网具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 尹浩, 韩阳. 量子通信原理与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 43-55.
YIN H, HAN Y. Quantum communication principle and technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 43-55.
- [2] 刘林曜, 胡孟军, 吕洪君, 等. 基于任意 Bell 态的量子密钥分配[J]. 量子电子学报, 2013, 30(4): 439-444.
LIU L Y, HU M J, LV H J, et al. Quantum key distribution protocol based on any Bell state[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(4): 439-444.
- [3] CABELLO A. Quantum key distribution without alternative measurements[J]. Physical Review A, 1999, 61(3): 052312
- [4] 刘晓慧. 多用户量子通信方案及协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 37-50.
- Liu X H. Study on scheme and protocol of multi-user quantum communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013: 37-50.
- [5] 龙桂鲁, 王川, 李岩松, 等. 量子安全直接通信[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, 22(4): 382-386.
LONG G L, WANG C, LI Y S, et al. Quantum secure direct communication [J]. Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2011, 22(4): 382-386.
- [6] 孙莹, 杜建忠, 秦素娟, 等. 具有双向认证功能的量子秘密共享方案[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 4689-4694.
SUN Y, DU J Z, QIN S J, et al. Quantum secret sharing with bidirectional authentication[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 4689-4694.
- [7] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 267-271.
YIN H, MA H X. Military introduction to quantum communication [M]. Beijing: Military Science Publishing House, 2006: 267-271.
- [8] COLLINS D, Gisin N, DE RIEDMATTEN H. Quantum relays for long distance quantum cryptography [J]. Journal of Modern Optics, 2005, 52(5): 735-753.
- [9] VAN METER R, LADD T D, MUNRO W J, et al. System design for a long-line quantum repeater [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 17(3): 1002-1013.
- [10] 裴昌幸, 闫毅, 刘丹, 等. 一种基于纠缠态的量子中继通信系统[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2422-2426



PEI C X, YAN Y, LIU D, et al. A quantum repeater communication system based on entanglement[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2422-2426.

[11] 薛乐, 聂敏, 刘晓慧. 量子信令中继器模型及性能仿真[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 116-121.

XUE L, NIE M, LIU X H. A model of quantum signaling repeater and its parameters simulation [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 116-121.

[12] BRUSCHI D E, BARLOW T M, RAZAVI M. Repeat-until-success quantum repeaters [J]. Physical Review A, 2014, 90(3): 22232-22245.

[13] DUAN L M, LUKIN M D, CIRAC J I, et al. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics[J]. Nature, 2001, 414(6862): 413-418.

[作者简介]



许敏(1991-),女,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为量子通信。



聂敏(1964-),男,博士,西安邮电大学教授、硕士生导师,主要研究方向为量子通信、移动通信和移动自组网。



杨光(1977-),女,西北工业大学博士生,西安邮电大学讲师,主要研究方向为通信网、量子通信。



裴昌幸(1945-),男,西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信及抗干扰、网络测量和量子通信。