

doi: 10.3788/gzxb20124109.1108

低轨道量子卫星通信星上交换算法及仿真

王志, 聂敏

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘 要:量子卫星通信能够解决量子移动通信在航海、航空领域中对于远距离和大范围的需求,而星上交换是量子卫星通信的关键技术之一.本文以低轨道量子卫星通信星上交换为研究对象,提出了一种新的星上交换算法——终端测距法.利用该算法测得终端到相邻小区中心的距离,并将测得的数据上传给当前服务卫星系统,再由卫星系统通过比较距离大小决定终端是否切换.数学分析和仿真结果表明,该算法可靠性高、操作方便,能够在各卫星之间实现平稳切换.

关键词:量子通信;星上交换;全球卫星通信;个人通信;低轨道量子卫星

中图分类号:G301

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)09-1108-5

0 引言

传统的卫星通信具有传输距离远,覆盖面积大、灵活、稳定等优点^[1],但是其开放式无线接口使得信息安全得不到有效保障^[2-4].而量子通信具有绝对的安全保密性,这一点得到了量子不可克隆定理和测不准原理的保证.将量子通信安全保密性与传统卫星通信灵活性相结合,构造安全、保密、灵活的卫星通信系统是当务之急^[5].

在量子卫星通信^[6]系统中,星上交换是关键技术之一.低轨道卫星^[7]通信系统作为构造全球量子无缝通信系统正在研究中.由于轨道上的卫星运行速度快,一般为每小时上万公里,每颗卫星覆盖多个小区,每个小区覆盖区域有限.一般情况下,在地面上运行的移动台,其移动速度相对于卫星运行速度来说非常小,可以忽略不计.如果移动用户通话有一段时长,那么当前为其服务的卫星,很有可能已经远离此移动台而不能继续为其服务.在这种情况下,为移动台服务的当前卫星就需要切换到在其服务范围内的其它卫星^[8-10].本文针对低轨道量子卫星通信系统星上交换技术,提出了低轨道量子卫星通信星上交换算法——终端测距法.对低轨道量子卫星通信星上交换过程进行了计算分析,仿真结果表明,本文所提出的交换算法可靠性高,能够在各卫星间实现平稳切换.

1 星上交换的四种模型

在卫星移动通信系统中,切换可分为两大类,即

波束内的切换和波束间的切换^[11].同理,在量子卫星通信系统中,切换也可分为两大类,即频道内切换和频道间切换.频道内的切换,只涉及频道内信道的分配.频道间的切换,涉及到卫星星座、地球站、控制中心的共同作用.本文主要研究频道间切换问题.图 1~图 4 是四种频道间的切换模型.图中虚线表示卫星覆盖区,实线小圈表示卫星频道服务区,每个服务

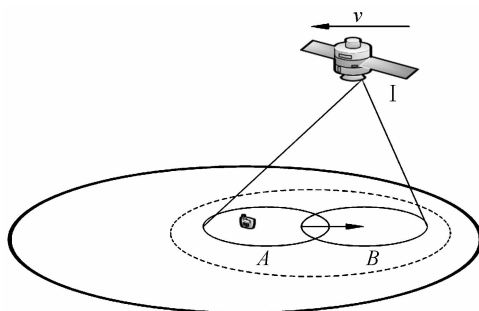


图 1 同一地球站同一卫星不同频道间的切换
Fig. 1 The same earth station to switch between the different channels of the same satellite

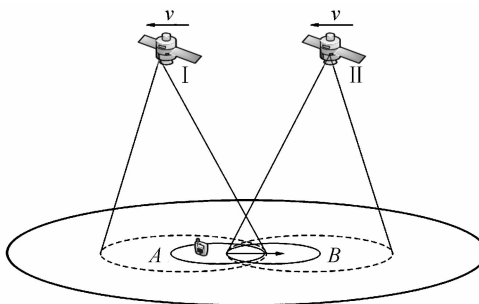


图 2 同一地球站不同卫星间切换
Fig. 2 The same earth station to switch between different satellites

基金项目:国家自然科学基金(No. 61172071)、陕西省自然科学基金研究计划(No. 2010JM8021)和陕西省教育厅自然科学研究项目(No. 2010JK834)资助

第一作者:王志(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为量子通信和移动通信. Email: wangwanwangzhi@163.com

导师:聂敏(1964-),男,教授,博士后,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: niemin@xupt.edu.cn

收稿日期:2012-03-05;修回日期:2012-04-18

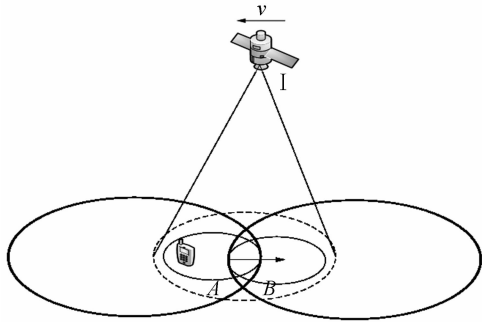


图3 不同地球站同一卫星不同频道间切换
Fig.3 The different earth station to switch between different channels of the same satellite

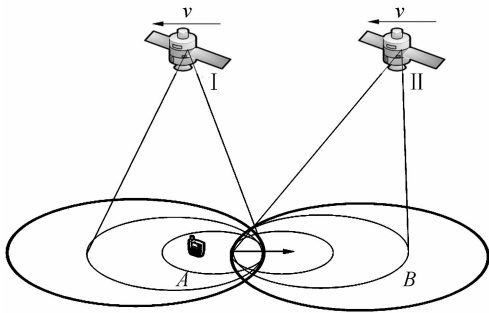


图4 不同地球站不同卫星间切换
Fig.4 The different earth station to switch between different satellites

区和固定的频道相对应,粗线大圈表示地球站覆盖区.

2 切换的条件

切换的条件是使用终端测距法.每个终端在通信过程中不停的测量与其相邻小区中心的距离 x_i (x_i 表示频道 i 的小区中心到移动台的直线距离),并且周期性的上传给当前服务卫星系统,卫星系统根据终端上传的数据,进行比较后选出最小的 x_i ,并搜索 x_i 是移动台到哪个小区中心的距离,然后再发出切换指令,使移动台切换到距离小区中心最近的小区继续通信.为分析方便,建立数学模型,图5是终端测距法的数学模型.假设 Alice 在频道2的A处,是静止不动的,Bob在频道1的B处沿 $o_1 o_2$

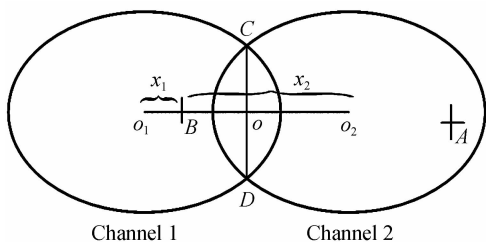


图5 终端测距法数学模型
Fig.5 The mathematical model of terminal measure-distance method

方向运动.对于 Alice,由于 Alice 是静止不动的,故始终有

$$x_1 < x_2 \leq x_3 \cdots x_{N-1} \leq x_N \tag{1}$$

式中 x_1 表示频道1的小区中心到 Alice 的直线距离, x_2 表示频道2的小区中心到 Alice 的直线距离, x_j 表示频道 j 的小区中心到 Alice 的直线距离.

对于 Bob,初始时有式(1),其中 x_j 表示频道 j 的小区中心到 Bob 的直线距离.随着 Bob 的继续运动,当 Bob 运动至 o 点时,有

$$x_1 = x_2 \leq x_3 \cdots x_{N-1} \leq x_N \tag{2}$$

当 Bob 跨过 o 点时,有

$$x_2 < x_1 \leq x_3 \cdots x_{N-1} \leq x_N \tag{3}$$

此时,卫星系统发出切换指令,系统开始切换.

图中两个圆代表卫星频道的两个服务区, A 表示 Alice 的位置, B 表示 Bob 的位置, o_1 、 o_2 表示小区的中心, o 是 $o_1 o_2$ 连线的中点, x_1 表示 $o_1 A$ 的距离, x_2 表示 $o_2 A$ 的距离, CD 是两圆的相交线.

3 星上交换过程

对于上述四种频道间的切换情况,就切换的实质而言,是当前卫星或者频道已经不再是最佳服务小区(最佳服务小区:与移动台相邻的所有小区中,小区中心距离移动台最近的那个小区)了,需要重新建立信道,如图5所示,也就是说,如果 Bob 跨过弦 CD 进入频道2时,为 Bob 服务的当前频道或者卫

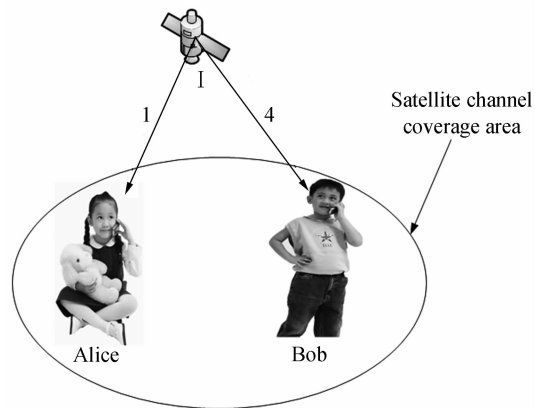


图6 Alice 和 Bob 在同小区内通信的情况
Fig.6 Alice and Bob communicate in the same cell

星就要切换到更适合的频道或者卫星.为方便分析,假设 Alice 是静止不动的,她的初始态为 $|\varphi\rangle$, Bob 是运动的,他的初始态为 $|\theta\rangle$.设初始时, Alice 和 Bob 正在通信,他们的共享量子纠缠态为 $|\Phi\rangle_{14}$,由于 Alice 是静止不动的,由终端测距法始终有式(1).通信初始时,如图6所示, Alice 和 Bob 的共享量子纠缠态为 $|\Phi\rangle_{14}$,可表示为

$$|\Phi\rangle_{14} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\varphi\rangle_1 |\varphi\rangle_4 + |\theta\rangle_1 |\theta\rangle_4) \tag{4}$$

当 Bob 穿过弦 CD 时,如图7所示,由终端测距法可知,此时卫星系统满足切换条件.切换步骤如下:

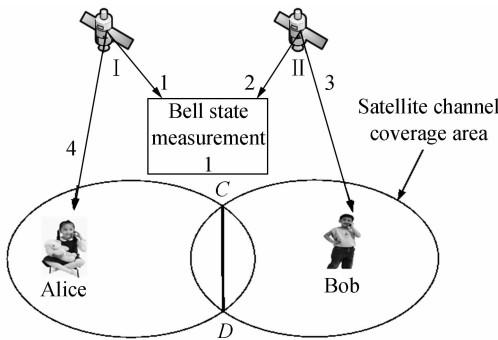


图 7 Alice 和 Bob 在不同小区内通信的情况
Fig. 7 Alice and Bob communicate in the different cell

1) 地面控制中心发出切换指令,并在整个系统中搜索,当前哪颗卫星是最佳服务卫星(最佳服务卫星:此时哪颗卫星覆盖区域中的某一小区中心距离当前移动台最近的卫星),由图 7 易知, I 号和 II 号卫星恰好是最佳服务卫星. 设通信初始时 I 号卫星产生的纠缠光子对是 1 和 4.

2) I 号和 II 号卫星收到切换指令,马上产生纠缠光子对,设 II 号卫星产生的纠缠光子对为 2 和 3,其初始量子态分别为 $|\sigma\rangle$ 和 $|\rho\rangle$.

3) 地面控制中心对光子 1 和 2 进行 Bell 态测量. 选取测量的 Bell 基为

$$|E\rangle_{12} = (|\theta\rangle_1 |\theta\rangle_2 + |\rho\rangle_1 |\rho\rangle_2) / \sqrt{2}$$

纠缠光子 1,4 表示为 $|\Phi\rangle_{14}$, 纠缠光子 2,3 表示为 $|\Phi\rangle_{23} = (|\sigma\rangle_2 |\sigma\rangle_3 + |\rho\rangle_2 |\rho\rangle_3) / \sqrt{2}$, 那么由光子 1,2,3,4 组成的系统状态可以表示为

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{1234} &= |\Phi\rangle_{14} \otimes |\Phi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\varphi\rangle_1 |\varphi\rangle_4 + \\ &|\theta\rangle_1 |\theta\rangle_4) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|\sigma\rangle_2 |\sigma\rangle_3 + |\rho\rangle_2 |\rho\rangle_3) = \\ &\frac{1}{2} (|\varphi\rangle_1 |\varphi\rangle_4 |\sigma\rangle_2 |\sigma\rangle_3 + |\varphi\rangle_1 |\varphi\rangle_4 |\rho\rangle_2 |\rho\rangle_3 + \\ &|\theta\rangle_1 |\theta\rangle_4 |\sigma\rangle_2 |\sigma\rangle_3 + |\theta\rangle_1 |\theta\rangle_4 |\rho\rangle_2 |\rho\rangle_3) \end{aligned} \quad (5)$$

通过测量后得到

$$|E\rangle_{12} |\Psi\rangle_{1234} = |E\rangle_{12} [|\Phi\rangle_{14} \otimes |\Phi\rangle_{23}] = |\Psi\rangle_{43} \quad (6)$$

由此可知,初始时 1,4 是纠缠光子对,2,3 是纠缠光子对,通过选定适当的 Bell 基对光子 1,2 进行 Bell 态测量,就可以实现光子 4,3 的纠缠,实现纠缠交换,建立新的链路,从而完成切换过程.

上述切换情况,可以推广到更多的卫星之间的切换. 假设 Alice 和 Bob 通信跨过了 n 个卫星,如图 8 所示. Bob 经过了 m 个小区,这样,就进行了很多次切换. 每次切换只要选取适当的 Bell 基就可以实现纠缠交换. 设第 1 次测量选取的 Bell 基为 $|E\rangle_{23}$, 第 2 次测量选取的 Bell 基为 $|E\rangle_{45}, \dots, \dots$, 第 N 次测

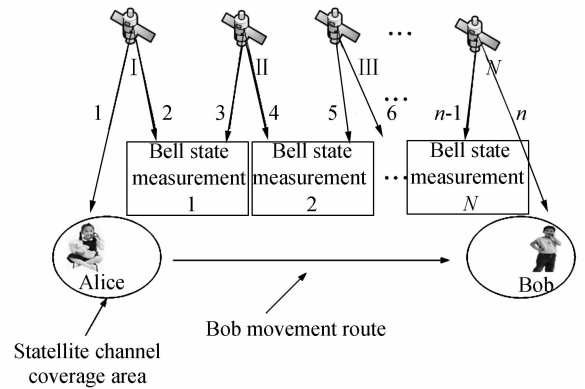


图 8 Alice 和 Bob 经过 N 个卫星切换通信模型
Fig. 8 Alice and Bob switch through N satellite communication model

量选取的 Bell 基为 $|E\rangle_{(n-2)(n-1)}$, 最终有

$$\begin{aligned} (|E\rangle_{23} |E\rangle_{45} \cdots |E\rangle_{(n-2)(n-1)}) |\Psi\rangle_{1\dots n} = \\ (|E\rangle_{23} |E\rangle_{45} \cdots |E\rangle_{(n-2)(n-1)}) (|\Phi\rangle_{12} \otimes |\Phi\rangle_{34} \otimes \\ |\Phi\rangle_{56} \otimes \cdots \otimes |\Phi\rangle_{(n-1)n}) = |\Psi\rangle_{1n} \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(7),可以看出,新的纠缠已经建立,通信得以继续进行. 通过多级量子交换,实现了纠缠交换,这就是本文所提出的低轨道量子卫星通信星上交换技术.

4 高速移动及高速切换时模型描述

在非理想情形下,例如相比地面而言,终端位置的变化、高速移动、以及高速切换的情况. 由于移动终端位置高速运动导致多普勒效应,致使不同频率的光子在运动过程中探测器探测光子频率发生变化. 引入光子高速频移因子 δ , 其表达式为

$$\delta = \sqrt{1 - \beta^2} / (1 - \beta \cos \theta) \quad (8)$$

$\beta = V_1 / V_2$ (V_1 表示移动台的移动速度, V_2 表示卫星的运行速度), θ 表示接收器与频率源连线到速度方向的夹角. 图 9 为移动台高速运动过程相关参量示意图.

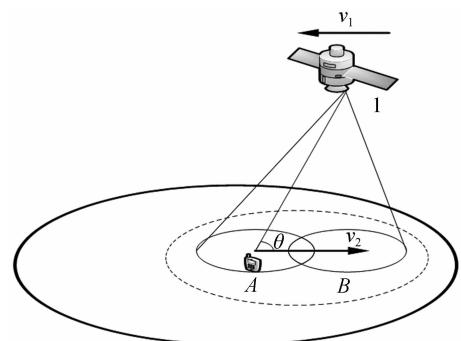


图 9 同一地球站同一卫星不同频道间的切换(高速切换)
Fig. 9 The same earth station to switch between switch the different channels of the same satellite (high speed handover)

因此由于多普勒效应引起的多普勒频移为

$$f' = \delta f = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} f \quad (9)$$

由于移动台的高速行驶导致多普勒效应引起接收方探测到的光子频率有所变化,很可能导致切换的失败.为此,需要对接收方探测到光子的频率进行补偿,引入光子频率补偿因子 γ ,其表达式为

$$\gamma = \frac{1-\beta\cos\theta}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (10)$$

接收端最后接收到的光子频率

$$f'' = f' \cdot \gamma = \delta f \cdot \gamma = f \quad (11)$$

这样由于高速移动引起的多普勒效应就解决了,高速切换也就和低速切换情况类似了.

5 仿真分析

为了验证本文算法和方案的正确性,采用 Matlab 进行仿真实验.参量如下:两个用户通信过程中平均切换 6 次,系统的呼损率为 5%,测量误差期望值为 0.001,方差为 3.6×10^{-7} ,仿真结果如图 10.

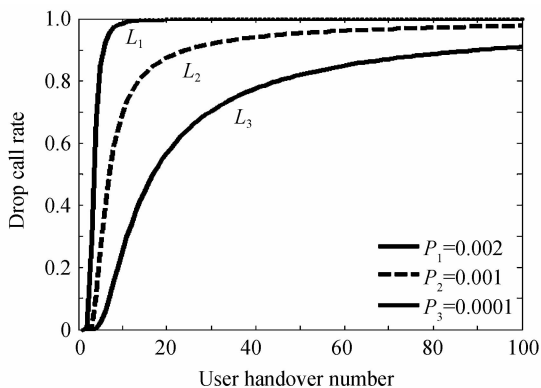


图 10 切换次数与掉话率关系

Fig. 10 The relationship of handover number and drop call rate

图 10 中, L_1 、 L_2 、 L_3 表示切换过程中 Bell 态测量时,测量误差分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 时用户切换次数和掉话率的关系曲线。 L_1 、 L_2 、 L_3 三条曲线变化趋势,都是随着用户切换次数的增加,切换掉话率在不断的增加,最终保持水平趋近于 1,表示当用户切换次数无限增加时,无论测量误差多么的小,由于误差累积效应,最终是不会切换成功的.当用户切换次数一定时,选取的测量误差越小,切换掉话率越低。 L_1 曲线选取的测量误差是 0.002,从 L_1 曲线可以看出,当用户切换次数在 0~10 之间时,随着用户切换次数的增加,掉话率急剧增加,这个过程由于选取的测量误差过大,造成 Bell 态测量误差过大,致使量子态测量结果发生错误的概率变大,所以切换的掉话率急剧增加.当用户切换次数超过 10 次以后,随着用户切换次数的增加,系统切换掉话率基本保持

不变接近为 1,此时由于测量的累积误差已经超过系统切换允许的最小测量误差,导致系统不能够实现切换; L_2 曲线选取的测量误差是 0.001,从 L_2 曲线可以看出,当用户切换次数在 0~10 之间时,随着用户切换次数的增加,掉话率急剧增加,但没有 L_1 曲线那么陡峭.当用户切换次数在 20~50 之间时,随着用户切换次数的增加,系统切换掉话率变化比较平缓,但是掉话率还是比较的高,保持在 90%左右,这个过程由于选取的测量误差不是很大,系统偶尔还是可以切换成功的.当用户切换次数超过 50 次以后,切换掉话率很高,趋向于 1. L_3 曲线选取的测量误差是 0.0001,从 L_3 曲线可以看出,用户切换次数在 0~20 之间时,随着用户切换次数的增加,掉话率急剧增加,但比 L_2 曲线要平缓些,这个过程由于测量误差的累积效应,切换掉话率变化较快.用户切换次数在 20~100 之间时,随着用户切换次数的增加,切换掉话率变化比较平缓,这个过程由于选取的测量误差比较小,积累误差增加缓慢,所以掉话率变化比较的缓慢,但是切换掉话率还是比较的高,平均值保持在 60%左右.

6 结论

本文提出了低轨道量子卫星通信星上交算法,仿真分析表明,该算法能够实现低轨道量子卫星间平稳切换.对于构造全球量子卫星通信信令系统及其标准的制定具有极为重要的技术支撑作用,并且对于未来量子星际通信起到了桥梁作用.

参考文献

- [1] HU Guang-zhen. Looking to the future of satellite communications[J]. *Telecom Science*, 2003, **48**(2):27-30.
胡光镇. 瞻望卫星通信的未来[J]. *电信科学*, 2003, **48**(2):27-30.
- [2] QUAN Dong-xiao, PEI Chang-xing, LIU Dan, *et al.* One-way deterministic secure quantum communication protocol based on single photon[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.
- [3] 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,裴敏,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.
- [4] LIU Dan, PEI Chang-xing, QUAN Dong-xiao, *et al.* A new quantum secure direct communication scheme with authentication[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(5): 306-308.
- [5] ZHU Chang-hua, PEI Chang-xing, QUAN Dong-xiao, *et al.* A new quantum key distribution scheme based on frequency and time coding[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(9): 301-304.
- [6] LIU Xiao-hui, NIE Min, PEI Chang-xing. Satellite quantum

- communication system based on quantum repeating [C]. Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on, 2011: 2574-2577.
- [7] ZHANG Nai-tong, LIU Hui-jie, CHU Hai-bin. Thinking on the development of a satellite mobile communications [J]. *Journal of Electrical and Electronic Teaching*, 2002, **24**(1): 1-6.
- [8] SUN Bin, YAN Jian, ZHANG Yu. OBS and OBP scheme for GEO mobile communication satellite[J]. *Vedio Engineering*, 2010, **34**(8): 180-183.
- [9] CHEN Ya, SHEN Zi-cheng. Onboard switching technique in satellite communication[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2003, **22**(3): 59-62.
- 陈雅, 沈自成. 卫星通信中的星上交换技术[J]. *飞行器测控学报*, 2003, **22**(3): 59-62.
- [10] EL-ALFY E S, YAO Y D, HEFFES H. Adaptive resource allocation with prioritized handoff in cellular mobile networks under Qos Provisioning [C]. Proceedings of the Vehicular Technology Conference, 2001: 2113-2117.
- [11] GUNTSCHE A. Mobility management in an integrated GSM and satellite PCN [C]. Vehicular Technology Conference, 1996: 1830-1834.

Algorithm and Simulation Onboard Switching in Low Earth Orbit Quantum Satellite Communication

WANG Zhi, NIE Min

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710061, China)

Abstract: Quantum satellite communication can meet the requirement of quantum mobile communication among sailing, aviation field with long-distance and extensiveness communications, and onboard switching is one of the key techniques in quantum satellite communication. Based on the onboard switching technique in low earth orbit (LEO) quantum satellite communication, a novel algorithm is proposed that is terminal measure-distance method. By using this algorithm, the distances between terminals and its adjacent cell center are measured, and then the distances data are uploaded to the current satellite system, finally the satellite system compares the distances and determines whether to handover or not. Mathematical analysis and simulation results show that the proposed algorithm has high reliability, is easy to operate, and can smoothly switch between the different satellites.

Key words: Quantum communication; Switching in satellite; Global satellite communication; Individual communication; Low-Earth-orbit quantum satellite