

doi: 10.3788/gzxb20124105.0581

量子移动通信中纠缠信令越区切换策略及仿真

连涛¹, 聂敏¹, 刘晓慧^{1,2}

(1 西安邮电学院 通信与信息工程学院, 西安 710061)

(2 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 西安 710071)

摘 要:量子移动通信是量子力学与移动通信相结合的崭新的通信技术,具有灵活、高效、安全、保密的优势.本文提出了基于纠缠度计算的同小区内不同扇区天线之间纠缠信令的越区切换策略.研究了量子移动通信终端与天线纠缠度随距离及角度变化关系.在此基础上,对信令的越区切换进行了建模仿真.结果表明,本文所提出的纠缠信令切换策略可靠性高,对于构建未来量子移动通信系统及其信令标准的制定具有重要的技术支持作用.

关键词:量子移动通信;纠缠信令;越区切换策略;量子纠缠;切换仿真

中图分类号:G301

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)05-0581-5

0 引言

量子移动通信具有灵活、高效、安全、保密的优势,是移动通信未来的发展方向.在量子移动通信系统中,信令的越区切换是关键技术之一.传统移动通信系统信令切换是基于信号强度测量的,但是量子移动通信涉及到量子纠缠问题,这种越区切换与传统的移动通信有着本质的区别.当然,量子移动通信纠缠信令切换成功率不可避免地会受到环境噪音的影响.文献[1]提出了在两体纠缠系统中,一个子系统纠缠状态进入随机噪音信道后,此系统纠缠度的变化规律.此时系统纠缠度取决于信道对最大纯纠缠态的影响.文献[2]研究了当纠缠子系统通过带有噪音的信道后,辅助纠缠度随时间的变化关系,提出了一个系统纠缠度变化方程.文献[3]给出了辅助型纠缠度的上下边界和约束条件.文献[4]提出了外部磁场对纠缠度的影响.其研究成果揭示了这样一个规律,当纠缠系统处于指数型变化的磁场中时,系统最终的纠缠度可以维持和保存.很显然,上述研究成果不仅具有明显的创新性,而且对于量子移动通信信令切换成功率的研究具有重要的理论意义和参考价值,具体包括以下两点:1)文献[1-2]所提出的噪音对纠缠度变化影响的方程,对量子移动通信纠缠信令越区切换协议和算法的设计至关重要;2)文献[3-4]所提出的纠缠度边界条件和纠缠度的维持保存,对于量子移动通信系统组网设计、纠缠信令切换

以及小区规划等都具有重要的理论指导意义.

在此基础上,本文首先提出了一种基于纠缠度计算的纠缠信令越区切换策略,然后通 MATLAB 仿真,研究了量子移动终端与天线之间的纠缠度随距离及角度变化的关系,并对量子移动通信系统^[5-7]中同小区不同扇区之间的纠缠信令切换进行了仿真研究.

1 纠缠信令切换策略及算法

1.1 信令纠缠度的计算

不失一般性,假设量子移动通信基站仍然采用三扇区天线,考虑到量子信令测量的可操作性和方便性,量子移动终端(Quantum Mobile Station, QMS)与量子基站(Quantum Base Station, QBS)天线(依次编号为 1、2、3)之间的信令纠缠度^[8-11]可表示为

第一扇区

$$E_{m_1} = \left| \cos \left[\theta - \frac{\pi}{3} - \frac{\pi + \alpha_1}{6} \delta(\theta) + \frac{\pi + \alpha_1}{6} \delta \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \right] \right| / R \quad (1)$$

第二扇区

$$E_{m_2} = \left| \cos \left[\theta - \frac{\pi + \alpha_2}{6} \delta \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + \frac{\pi + \alpha_2}{6} \delta \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right] \right| / R \quad (2)$$

基金项目:国家自然科学基金(No. 61172071, No. 61072067)、陕西省自然科学基金(No. 2010JM8021)、陕西省教育厅自然科学基金项目(No. 2010JK834, No. 2011JK1017)和西安邮电学院青年教师科研基金(No. ZL2010-05)资助

第一作者:连涛(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为量子通信、移动通信. Email: tomliantao@126.com

导 师: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: niemin@xupt.edu.cn

收稿日期:2011-12-15; **修回日期:**2012-02-08

第三扇区

$$E_{m_3} = \left| \cos \left[\theta - \frac{5}{3}\pi - \frac{\pi + \alpha_3}{6} \delta \left(\theta - \frac{4}{3}\pi \right) + \frac{\pi + \alpha_3}{6} \delta (\theta - 2\pi) \right] \right| / R \quad (3)$$

$$R = 2 \times \sqrt{r^2 + |h - H|^2} \quad (4)$$

如图 1 所示,椭圆表示一个量子基站所覆盖的区域,椭圆中心处为量子基站, Alice 是一个量子移动终端,其中 θ 为量子移动终端的偏角,表示第一扇区 0° 角时边界线到量子移动终端与基站中心 o 点连线的夹角; r 是量子移动终端到基站中心 o 点的水平距离; h 表示量子移动终端与地面的相对高度; H 表示量子基站天线相对地面的高度; α_i 是一个很小但不为零的数,作为补充相位,以保证在边界处的纠缠信令传递能够正常进行,且用来区别不同的扇区.

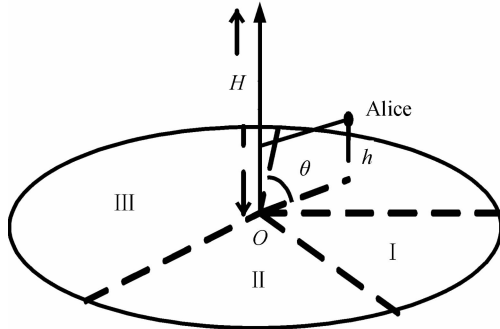


图 1 同小区内量子移动终端扇区切换模型

Fig. 1 Quantum mobile terminal sector handover model under the same cell

1.2 量子纠缠信令切换策略

在传统的蜂窝通信系统中,为了实现无缝覆盖,一个移动终端周围通常有多个基站,移动终端可以收到不同基站发来的信令. 为获得最佳的通信质量,移动终端始终选择信令信号最强的基站为当前基站. 然而在量子移动通信系统中,信令通过纠缠对来传递. 在一个基站的三扇区中,量子移动终端为得到最好的通信质量,采用最优纠缠度法则选取天线,即同小区内量子移动终端始终选择与之纠缠度最大的天线为当前业务天线. 因此,越区切换的条件必须满足:1)量子移动终端位于扇区边界,即跨边界的过程中;2)量子移动终端与天线的最大纠缠度不是当前服务天线与之产生.

1.3 算法描述

假设量子移动终端 Alice 与各天线的量子态分别表示为: $|\psi\rangle_A$ 和 $|\psi\rangle_{E_1}$ 、 $|\psi\rangle_{E_2}$ 、 $|\psi\rangle_{E_3}$,且 $|\psi\rangle_A$ 与 $|\psi\rangle_{E_1}$ 、 $|\psi\rangle_{E_2}$ 、 $|\psi\rangle_{E_3}$ 分别构成相互纠缠的量子纠缠对,用以进行纠缠信令的传递^[5]. 具体算法如下:

1) Alice 与天线 1 的纠缠度如式(1)表示,记作 E_{m_1} ;

2) Alice 与天线 2 的纠缠度如式(2)表示,记作 E_{m_2} ;

3) Alice 与天线 3 的纠缠度如式(3)表示,记作 E_{m_3} ;

假设 Alice 在扇区 I 中,如图 2(a)所示. 在运动过程中, Alice 采用最大纠缠度准则选择天线. 随着 Alice 位置的改变,纠缠度随之变化的运动在通信过程中必然可能发生切换. 为了便于仿真,假定 Alice 运动速度恒定为 v ,分为两种运动形式:

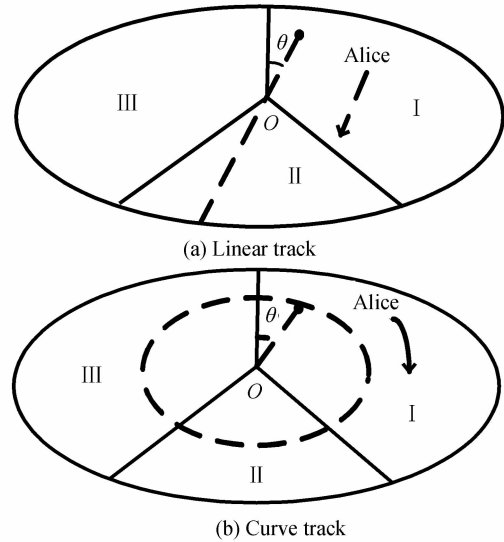


图 2 Alice 的直线与曲线运动轨迹

Fig. 2 Linear track and curve track of Alice

1) 直线运动,如图 2(a)所示, Alice 从第一扇区中的任意位置穿过基站运动到另一扇区中. 此时 θ 角度不变,量子移动终端与天线的纠缠度随着距离 r 的变化而变;

2) 弧形运动,如图 2(b)所示, Alice 在与基站距离 r 不变的情况下做弧型运动到另一扇区中. 此时相应纠缠度随着 θ 角度而改变.

根据以上分析,易知 Alice 任意随机运动都可以分解为以上两种运动形式,故本文只对以上两种运动形式下的切换做了仿真分析.

2 仿真结果与分析

仿真采用 MATLAB 软件,假设采用三扇区天线的量子移动通信基站距水平地面高度 H 为 32 m, 基站覆盖小区半径 R 为 1 000 m,量子移动终端高度 h 为 1.6 m,量子移动终端运动速度 v 为 10 m/s,每个量子移动终端到基站的距离 r 在 R 范围内随机产生,量子移动终端的偏角 θ 在 2π 内随机产生. 在仿真过程中共有 4 个量子移动终端分别用来做纠缠度 E_{ij} 与距离 r 、角度 θ_i 关系,及直线运动,弧形运动越区切换的仿真. 每一个量子移动终端与天线的纠缠度分别表示为 E_{ij} ,其中 i ($i=1,2,3,4$) 表示量

子移动终端编号; $j(j=1,2,3)$ 代表天线编号.

2.1 信令纠缠度仿真

随机产生量子移动终端 1 的偏角 $\theta_1=0.7925$, 量子移动终端 1 位于第一扇区, θ_1 不变, r 逐渐增大, 远离量子移动基站. 如图 3 可见纠缠度 E_{11} 、 E_{12} 、 E_{13} 均随着 r 的增大而逐渐减小, 且在相同的位置处

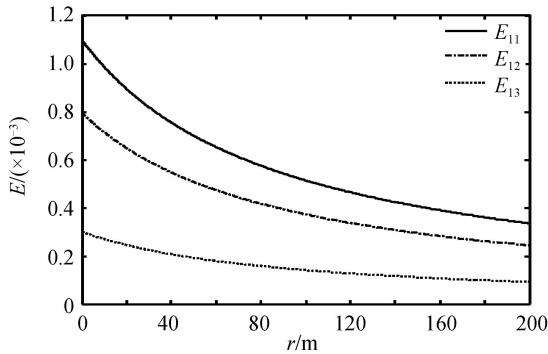


图 3 纠缠度与距离变化关系
Fig. 3 The Relationship between entanglement and variable distance

E_{11} 始终最大. 经过多次仿真数据分析, 可知量子移动终端一般在非边界附近均与所在扇区天线的纠缠度是最大的, 故默认初始量子移动终端服务天线都是量子移动终端所在扇区对应的天线.

随机产生量子移动终端 2 的初始偏角 $\theta_2 = 1.9433$, 量子移动终端 2 初始位于第一扇区边界附近, r 不变, θ_2 逐渐增大, 绕量子基站环形运动. 如图 4 可见此时量子移动终端与各天线纠缠度 E_{21} 、 E_{22} 、 E_{23} 在各扇区中都是随着角度 θ_2 的增大先变大后减小. 例如在第一扇区中, 量子移动终端与天线 I 的纠缠度 E_{21} 在 θ_2 从 0 开始增加到 $2\pi/3$ 的过程中先逐渐增大, 并且在 $\pi/3$ 处达到峰值后逐渐减小.

2.2 量子移动通信系统切换仿真

如随机产生量子移动终端初始偏角为 $\theta_3 = 0.9067$, 量子移动终端 3 初始位于第一扇区, 随着时间 T 的增加, 逐渐向量子基站运动并穿过基站进入第二扇区, r 先减小到达量子基站后增大. 如图 5 (a) 可见, 在此过程中纠缠度 E_{31} 、 E_{32} 、 E_{33} 均先增大

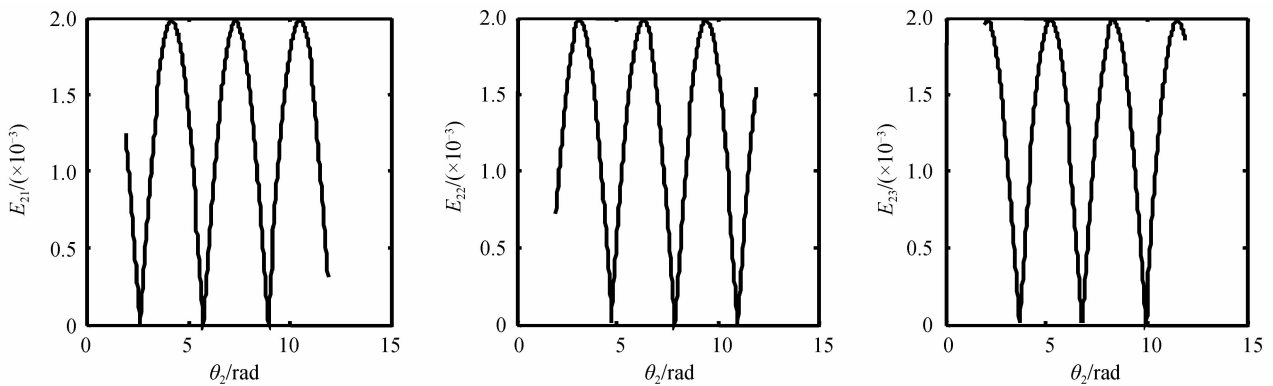


图 4 纠缠度与角度变化关系
Fig. 4 The relationship between entanglement and variable angle

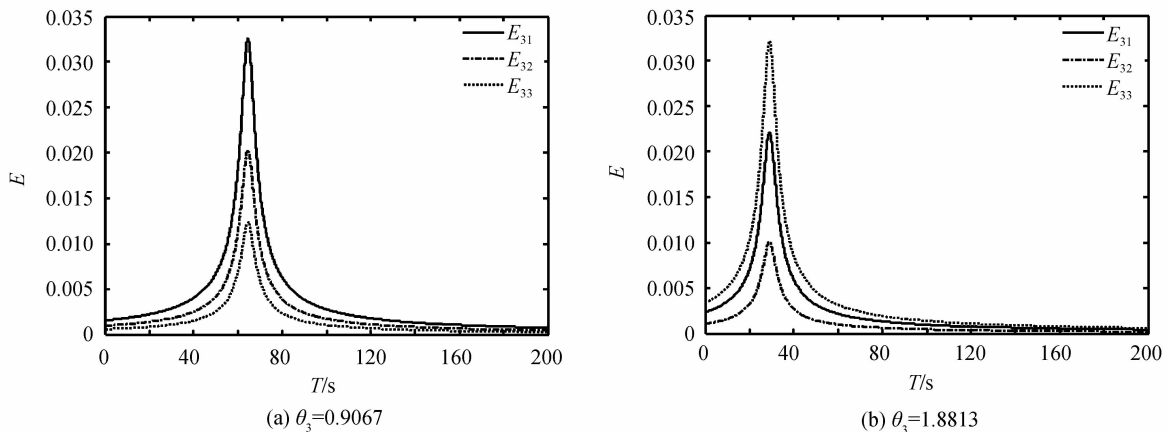


图 5 直线运动越过基站过程的切换仿真
Fig. 5 The handover simulation on the condition of linear motion crossing the base station process

后减小. 当量子移动终端刚跨入第二扇区的边界时, 如图 5(a) 可见纠缠度 E_{31} 最大, 而当前服务天线是天线 II, 满足切换条件①(量子移动终端位于小区边界, 即将跨边界的过程中)和②(量子移动终端与天

线的最大纠缠度不是当前服务天线与之产生), 故发生切换, 切换数为 1, 仿真结果也是 1. 证明在这种情况下, 此纠缠信令切换算法正确可靠.

随机产生量子移动终端初始偏角为 $\theta_3 =$

1.881 3,量子移动终端 3 初始位于第一扇区,逐渐向量子基站运动并穿过基站进入第三扇区, r 先减小到达量子基站后增大.如图 5(b)可见,在此过程中纠缠度 E_{31} 、 E_{32} 、 E_{33} 均先增大后减小.当量子移动终端刚跨入第三扇区的边界时,如图 5(b)可见纠缠度 E_{33} 最大,而当前服务天线也是天线 III,从而虽然满足切换条件①(量子移动终端位于扇区边界),但是不满足条件②(量子移动终端与天线的最大纠缠度不是当前服务天线与之产生)故发生切换,切换数为 0,仿真结果也是 0.证明在这种情况下,此纠缠信令切换算法正确可靠.

随机产生量子移动终端 4 的偏角 $\theta_4=5.1205$,量子移动终端 4 初始位于第三扇区中,绕量子基站做环形运动一圈,如图 6(a).同理经过数据分析,随着角度 θ_4 的变化量子移动终端 4 必将依次越过第三一扇区边界,一二扇区边界,二三扇区边界,经分析易知这三次越区都满足切换条件①和②,因此这样弧形运动一圈必将切换三次,仿真结果也是 3.证明在这种情况下,此纠缠信令切换算法正确可靠.

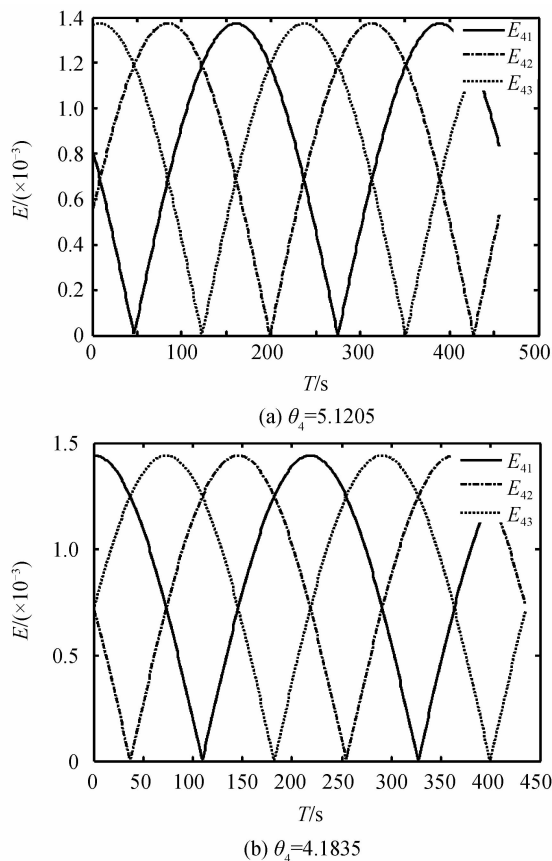


图 6 弧形绕基站运动过程的切换仿真

Fig. 6 The handover simulation on the condition of curve motion around the base station process

随机产生量子移动终端 4 的偏角 $\theta_4=4.1835$,量子移动终端 4 初始位于第三扇区边界处,绕量子基站做环形运动一圈,如图 6(b).同理经过数据

分析,随着角度 θ_4 的变化量子移动终端 4 必将依次越过第三一扇区边界,一二扇区边界,经分析易知这三次越区都满足切换条件①和②,因此这样弧形运动一圈必将切换两次,仿真结果也是 2.证明在这种情况下,此纠缠信令切换算法正确可靠.

3 结论

本文针对量子移动通信系统中的纠缠信令的越区切换问题,提出了基于纠缠度计算的越区切换策略.在此基础上,仿真分析了影响纠缠度的诸多因素,以及移动用户通过程中纠缠信令在各扇区之间的切换.结果表明,本文所提出的量子移动通信纠缠信令越区切换策略可操作性好、可靠性高.本研究对构建未来量子移动通信的信令系统及其标准的制定可提供必须的技术支撑.

参考文献

- [1] LI Z G, FEI S M, WANG Z D, *et al.* Evolution equation of entanglement for bipartite systems[J]. *Physical Review A*, 2009, **79**(2): 024303(4).
- [2] LI Z G, ZHAO M J, FEI S M, *et al.* Evolution equation for entanglement of assistance[J]. *Physical Review A*, 2010, **81**(4): 042312(5).
- [3] LI Z G, FEI S M, ALBEVERIO S, *et al.* Bound of entanglement of assistance and monogamy constraints[J]. *Physical Review A*, 2009, **80**(3): 034301(4).
- [4] ABLIZ A, GAO H J, XIE X C, *et al.* Entanglement control in an anisotropic two-qubit Heisenberg XYZ model with external magnetic fields[J]. *Physical Review A*, 2006, **74**(5): 052105(5).
- [5] ZHANG Tian-peng, NIE Min, PEI Chang-xing. Research on multi-particle entangled QTDM communication scheme and QMU protocol[J]. *Acta Physica 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.
- [6] PEI Chang-xing, YAN Yi, LIU Dan, *et al.* A quantum repeater communication system based on entanglement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **37**(12): 2422-2426.
裴昌幸, 阎毅, 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.
- [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] WOOTTERS W K. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits[J]. *Physical Review Letters*, 1998, **80**(10): 2245-2248.
- [9] HILL S, WOOTTERS W K. Entanglement of a pair of quantum bits[J]. *Physical Review Letters*, 1997, **78**(26): 5022-5025.
- [10] VIDAL G, WERNER R F. A computable measure of entanglement[J]. *Physical Review A*, 2002, **65**(3): 032314(12).
- [11] BENNETT C H, SHOR P W. Quantum information theory[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, **44**(6): 2724-2742.

Handover Strategy and Simulation of Entanglement Signaling in Quantum Mobile Communication

LIAN Tao¹, NIE Min¹, LIU Xiao-hui^{1,2}

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

(2 *State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: Quantum mobile communication with superiority of flexibility, high efficiency, security and confidentiality is a kind of new communication technology connected quantum mechanics and mobile communication. A kind of entanglement signaling handover strategy among different sector antennas in the same cell is put forward based on the entanglement degree calculation. The relationships between quantum mobile communication terminal and sector antenna with variable distance and angle respectively are studied, and the entanglement signaling the handover strategy is simulated and analyzed. The simulation results show that the proposed handover strategy has high reliability, which has a great technology supporting function for the future quantum mobile communication system and its standard formulation.

Key words: Quantum mobile communication; Entanglement signaling; Handover strategy; Quantum entanglement; Handover simulation