

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.017

引用格式:余翔,张丽,王蓉. LTE-A 中异构网络的切换分析[J]. 电讯技术,2014,54(1):89-96. [YU Xiang,ZHANG Li,WANG Rong. Analysis on Handover Process for Heterogeneous Network in LTE-A[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(1):89-96.]

LTE-A 中异构网络的切换分析*

余翔¹,张丽^{1,**},王蓉^{1,2}

(1. 重庆邮电大学,重庆 400065;2. 电子科技大学,成都 611731)

摘要:在传统网络数据流量爆发性增长、频谱效率已接近极限值的形式下,异构组网是增加网络容量、提高数据速率的有效方式。LTE-A 系统中异构组网引入低功率节点,缩短了网络与用户间距离,提高了无线链路质量和频谱效率,逐渐成为 LTE-A 系统中的关键技术之一,但同时也带来复杂的移动性管理等问题。在深入分析 3GPP E-UTRA 协议规范的基础上,首先建立了 LTE-A Macro-Pico 异构网络拓扑模型,然后对 Macro-to-Pico 和 Pico-to-Macro 双向切换概率进行了分析和仿真。在此基础上,给出了用户及其相关网络参数对于切换成功概率的影响分析。

关键词:LTE-A 系统;异构网络;Macro-Pico 网络模型;切换概率分析

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0089-08

Analysis of Handover Process for Heterogeneous Network in LTE-A

YU Xiang¹,ZHANG Li¹,WANG Rong^{1,2}

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications,Chongqing 400065,China;
2. University of Electronic Science and Technology of China,Chengdu 611731,China)

Abstract:Since the data traffic is growing so rapidly and the spectrum efficiency is close to the limitation of traditional network, heterogeneous network is becoming an effective way to increase the network capacity and data rate. In LTE-A system, the network introduces low power nodes, shortening the distance between the network equipment and terminal user, then improves the wireless link quality and spectrum efficiency. Currently, heterogeneous networking is becoming one of the key technologies in LTE-A system, but as a result, brings complicated mobility management issues. This paper tries to establish the LTE-A Macro-Pico heterogeneous network mobility model through the deep analysis of 3GPP E-UTRA specifications. It analyzes and simulates the “from Macro-to-Pico to Pico-to-Macro” dual-direction handover probability, then derives the impact of user’s moving speed and other network parameters on the handover success probability.

Key words:LTE-A; heterogeneous network; macro-pico network model; handover probability analysis

1 引言

先进的长期演进系统(Long Term Evolution-Advanced, LTE-A)中的异构网络(Heterogeneous Network, HetNet)在原有的宏小区组成的同构网络中增

加低功率节点(Low Power Nodes, LPNs),消除了小区覆盖盲点,扩大了网络覆盖范围,从而增加了网络容量和用户吞吐量,成为当前最有希望解决传统网络问题,提供性能上巨大飞跃的一个方案。异构网

* 收稿日期:2013-10-27;修回日期:2014-01-07 Received date:2013-10-27;Revised date:2014-01-07
基金项目:国家科技重大专项(2012ZX03006002003)
Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2012ZX03006002003)

** 通讯作者:zhangli890930@163.com Corresponding author:zhangli890930@163.com

络元素的多样化形成新的组网方式,在解决了大量用户需求的同时也带来了复杂的移动性管理问题。如何在多样化的异构组网中保持移动用户终端的通信持续性已经成为网络研究热点之一^[1-4]。

在 LTE-A 系统中,由于用户终端 (User Equipment, UE) 的移动性,为保证 UE 通信的连续不间断需执行切换过程,将 UE 的服务小区从源小区切换到可提供更强信号质量的目标小区。在同构网络中,UE 使用相同设置的切换参数切换到目标小区,但在异构网络中,如果 UE 也都使用相同的切换参数设置,将有可能增加切换失败或乒乓效应发生的概率,从而影响切换性能^[5]。切换问题将导致用户掉话、数据丢失和系统资源浪费等一系列的移动性管理问题,影响系统性能。为了提高网络切换性能,已有许多文献对切换算法、切换机制、切换过程等方面进行了研究和优化,本文将从切换参数配置方面分析对切换成功概率的影响,进而得到适当的配置来最大化切换成功的可能性^[6-7]。

本文主要研究 LTE-A 系统宏基站和微微基站组成的异构网络场景中用户服务网络的切换情况,通过分析 UE 在 Macro-Pico 异构网络模型中切换成功的概率,评估切换性能。网络仿真得出切换分析结果:不同参数条件对切换成功概率影响不同,特别是在高速移动情况下影响更为明显。比较分析各因素对切换成功概率的影响,适当调整和平衡切换参数配置,获取最大的切换成功可能性,进而使系统提供更大的带宽、更高的数据速率,改善网络覆盖情况,增加系统容量和提高用户吞吐量,满足用户对网络的需求。

2 LTE-A 异构网络

LTE-A 中异构网络 (HetNet) 是由宏小区 (Macrocell)、射频拉远 (Remote Radio Head, RRH) 和低功率节点 (LPNs) 混合组成的,其中,LPNs 包括微微基站 (Pico)、家庭基站 (Femto) 和中继节点 (Relay Node),它们有不同的发射功率、覆盖范围和回程,但它们的发射功率都小于宏小区,较同构网络减少了资源开销,降低了运营成本。网络中节点类型多样化,形成不同的组网结构,在实际部署场景中,可以根据周围的环境部署不同的网络结构来提高网络性能。LTE-A 中具体的网络部署场景有:单一宏小区网络 (Macrocell)、宏/微微小区 (Macro-Pico) 异构网络、宏/家庭基站 (Macro-Femto) 异构网络、宏/微

微小区/家庭基站 (Macro-Pico-Femto) 异构网络^[8]。这些网络元素形成的多层网络拓扑结构,有效地卸载了宏基站的负载,减小了接入网络和终端用户间的距离,提高了网络覆盖率和小区边缘用户的性能,增加了系统容量和用户吞吐量,并且通过空间复用提高了频谱利用率^[4,9]。

网络中家庭基站 (Femtocell) 一般服务于家庭或公司中的用户,服务范围较小,而微微小区 (Pico-cell) 与 Macrocell 有相似的回程和接入特性,但发射功率较小,成本较低,资源占用少,常被用来服务于宏基站渗透不充分的环境中的用户,增加系统容量,应用较普遍^[9]。因此,本文主要研究 Macro-Pico 异构网络模型,其拓扑结构如图 1 所示,图中“Macro”和“Pico”分别为宏基站和微微基站,“MUE”和“PUE”分别为宏小区和微微小区的用户终端。

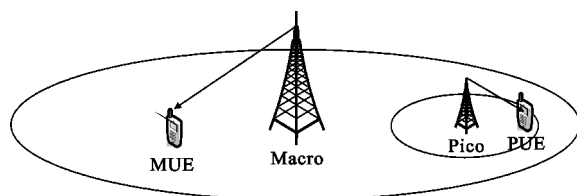


图 1 Macro-Pico 异构网络模型

Fig. 1 Macro-Pico heterogeneous network model

3 异构网络的切换

3.1 异构网络的切换

在传统同构网络中,用户总是驻留在下行信号质量最好的小区,这对于异构网络也同样适用。由于 UE 的移动性,服务小区覆盖范围的限制,为了始终保证 UE 的通信和对业务的访问不受位置变换的影响,需要对其进行切换管理,将服务小区从源小区切换到信号质量更强的目标小区。

根据 3GPP E-UTRA 规范,切换 (Handover, HO) 过程被分为 3 个阶段,如图 2 中的 state1、state2 和 state3^[10]。并且切换失败 (Handover Failure, HF) 发生的条件有以下三点,其中任意一点被满足都会导致切换失败:

- (1) 在 state2 阶段,UE 仍依附于源小区,发生了无线链路失败 (RLF) 的情况,见图 2;
- (2) 在 state2 阶段,T310 定时器被触发,并且当切换命令被 UE 接收到时仍然在运行,即在源小区发生了 PDCCH 失败;
- (3) 在 state3 阶段,UE 依附于目标小区,当切换

完成信息被发送,目标小区下行宽带 CQI 滤波均值小于阈值 Q_{out} (−8 dB),即在目标小区发生了 PD-CCH 失败。

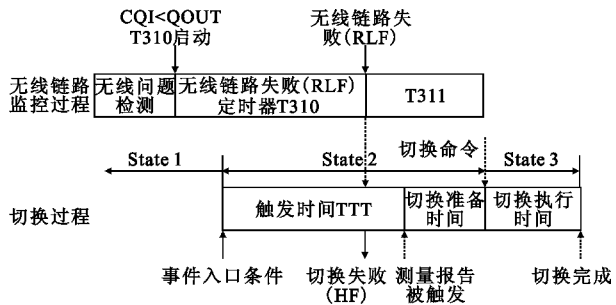


Fig. 2 Diagram of handover process and failure

结合图 2 和规范说明,如果在 state2 阶段没有发生 RLF 和源小区 PDCCH 失败,在 state3 阶段没有发生目标小区 PDCCH 失败,无线链路恢复,将不会影响切换过程,切换成功也有可能发生。为简化分析,下文将根据这些理论标准结合 Macro-Pico 异构网络模型从几何图解方面分析网络切换成功的概率。

3.2 切换模型

本文以 Macro-Pico 网络模型为基础研究 MUE 从 Macrocell 向 Picocell 切换,切换成功成为 PUE 后再从 Picocell 向 Macrocell 切换,即主要研究 LTE-A 异构网络中 Macro-to-Pico 和 Pico-to-Macro 两次切换过程。

参考文献[10]中的大区域范围模拟的模型,首先建立如图 3 所示的网络部署模型。

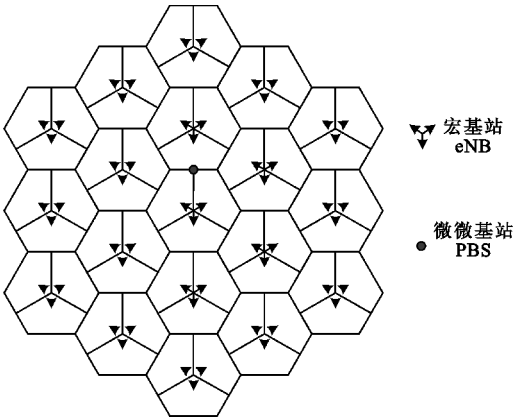


图 3 Macro-Pico 网络模拟模型

Fig. 3 Macro-Pico network simulation model

按照上述模型首先模拟 MUE 移动情况,得到图 4 显示的 MUE 切换触发和失败位置分布图,其中,切换失败位置和切换触发位置形成了两个同心圆^[5]。

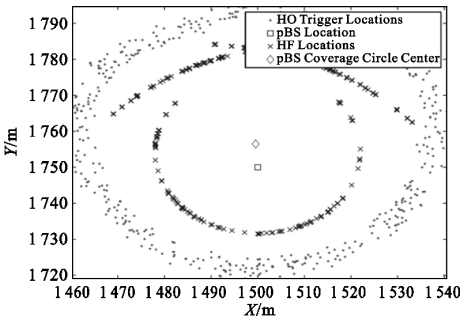


图 4 MUE 切换触发和失败位置分布

Fig. 4 The locations of MUE handover trigger and failure

MUE 向 Picocell 移动并切换成功后会成为 PUE。然后同理可模拟出 PUE 向 Macrocell 移动时的切换情况与图 4 相似,由于 PUE 是向 Picocell 外移动,因此 PUE 切换失败的位置应分布在切换触发位置范围的外层。为便于 UE 切换情况分析,可将上述位置分布简化为几何图解模型,如图 5 所示(UE 靠近 Picocell 覆盖边缘即触发切换,在 HF 圆上发生 HF,图 4 中切换触发范围为图 5 中的 Picocell 覆盖范围)^[5]。表 1 为图 5 中参数的说明。

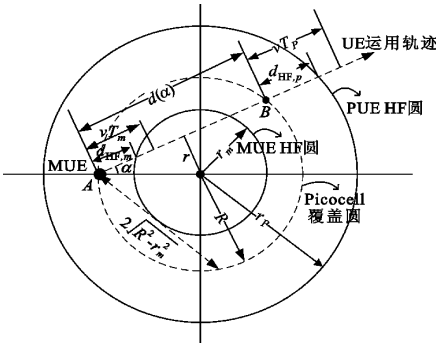


图 5 Macro-Pico 模型几何图解

Fig. 5 Macro-Pico model geometric diagram

表 1 几何模型参数说明

Table 1 The description of geometric model parameters

参数	说明
R	Picocell 覆盖圆半径
r_m	MUE HF 圆半径
r_p	PUE HF 圆半径
α	UE 运动轨迹与水平轴的夹角,范围为 $[-\pi, \pi)$
$d(\alpha)$	UE 运动轨迹与 Picocell 覆盖圆相交的弦的长度,范围为 $[0, 2R]$
r	圆心到 UE 轨迹弦的最短距离
v	UE 运动的速率
T_m	MUE 切换触发时间 TTT
T_p	PUE 切换触发时间 TTT
$d_{HF,m}$	轨迹弦从 A 点到与 MUE HF 圆相交的第一个交点间的长度,定义为 $d_{HF,m} = R\cos(\alpha) - \sqrt{r_m^2 - R^2\sin^2(\alpha)}$, 范围为 $[R-r_m, \sqrt{R^2-r_m^2}]$
$d_{HF,p}$	UE 的运动轨迹与 Picocell 覆盖圆和 PUE HF 圆相交的两点间的距离,定义为 $d_{HF,p} = R\cos(\alpha) + \sqrt{r_p^2 - R^2\sin^2(\alpha)} - d(\alpha)$, 范围为 $[r_p - R, \sqrt{r_p^2 - R^2}]$

3.3 切换概率分析

图 2 中的切换过程经历的时间包括 TTT、切换准备时间和切换执行时间。分析过程中,可忽略切换准备和执行时间,即统计的切换过程持续时长为 TTT。因此,MUE 和 PUE 完成切换需时间分别为 T_m 和 T_p ,在这段时间内移动的距离为 vT_m 和 vT_p 。

根据 3.1 节的规范说明,按照 UE 的移动顺序从几何图解上分析:首先 MUE 沿着直线向前移动,在 Picocell 覆盖圆上会触发切换过程,如图 5 中的 A 点,TTT 启动计时,在完成切换过程之前,即移动 vT_m 距离之前,若发生 RLF 或 PDCCH 失败,即 MUE 到达 MUE HF 圆,将会导致切换失败;反之,则会计为切换成功。其次,MUE 成功切换到 Picocell 后成为 PUE,继续向前移动会从 Picocell 覆盖圆再次向 Macrocell 切换,同理 MUE 切换过程分析,PUE 在 Picocell 覆盖圆上触发切换,如图 5 中 B 点,TTT 启动计时,在移动 vT_p 距离之前,若没有发生 RLF 或 PDCCH 失败,切换过程顺利完成,即没有经过 PUE HF 圆,则计为切换成功。

在 UE 移动过程中,可能发生不切换、切换成功和切换失败 3 种情况,因此,可以通过分析 3 种切换成功的概率来分析整个切换性能:MUE 不切换概率、MUE 切换成功概率和 PUE 切换成功概率。

根据文献[11],图 5 中 r 的概率密度函数为

$$f(r) = \frac{2}{\pi \sqrt{R^2 - r^2}} \quad (1)$$

由于 $r = \sqrt{R^2 - d(\alpha)^2/4}$,则由式(1)可推算 $d(\alpha)$ 的概率为

$$P(d_1 < d(\alpha) < d_2) = \int_{\sqrt{R^2 - d_2^2/4}}^{\sqrt{R^2 - d_1^2/4}} \frac{2}{\pi \sqrt{R^2 - r^2}} dr = \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}}\right) \Bigg|_{\sqrt{R^2 - d_2^2/4}}^{\sqrt{R^2 - d_1^2/4}} \quad (2)$$

3.3.1 MUE 不切换(MUE NHO)的概率

MUE 被触发切换后结束切换之前向 Picocell 覆盖圆边缘靠近,Picocell 的服务质量降低到原服务小区以下,MUE 停止切换过程,不切换到 Picocell,即 MUE 不切换。从几何图形上分析,MUE 的运动轨迹没有穿过 MUE HF 圆,并且穿过 Picocell 覆盖圆内的轨迹弦长度小于 vT_m ,切换过程没有完成,这些条件下将不切换,这些事件发生的概率就是 MUE 不切换的概率,记为 $P_{\text{NHO},m}$ 。

图 5 中,UE 运动轨迹与 MUE HF 圆相切时穿过 Picocell 覆盖圆的弦长为 $2\sqrt{R^2 - r_m^2}$,根据 $d(\alpha)$ 和

vT_m 与切线弦的大小关系可分以下两种情况来分析 MUE 不切换的概率:

(1) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$, $vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,由式(2)可得 MUE 不切换的概率为

$$P_{\text{NHO},m1} = P\{d(\alpha) < vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}\} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{2\sqrt{R^2 - v^2 T_m^2/4}}{vT_m}\right) \quad (3)$$

(2) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$, $vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,结合式(2)可得 MUE 不切换概率为

$$P_{\text{NHO},m2} = P\{d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}, vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}\} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) \quad (4)$$

综上所述两种情况所述,MUE 不切换的概率为

$$P_{\text{NHO},m} = \begin{cases} P_{\text{NHO},m1} \\ P_{\text{NHO},m2} \end{cases} = \begin{cases} 1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{2\sqrt{R^2 - v^2 T_m^2/4}}{vT_m}\right), & vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2} \\ 1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right), & vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2} \end{cases} \quad (5)$$

3.3.2 MUE 切换成功(MUE HO)的概率

结合 3.3 节的分析,只要满足 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时 $vT_m < d(\alpha)$,或者 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时 $vT_m < d_{\text{HF},m}$,即可成功切换。根据移动速度大小可从以下 3 种情况分析。

(1) $vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$

a) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,由(4)可知 MUE 不发生切换,即 MUE 切换成功概率为 $P_{\text{HO},m1a} = 0$ 。

b) 当 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,查表 1,必然有 $vT_m > d_{\text{HF},m}$,即必然发生切换失败,因此切换成功概率为 $P_{\text{HO},m1b} = 0$ 。

总之,当 $vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,MUE 切换成功的概率为

$$P_{\text{HO},m1} = P_{\text{HO},m1a} + P_{\text{HO},m1b} = 0 \quad (6)$$

(2) $\sqrt{R^2 - r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$

a) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时,切换成功需满足 $vT_m < d(\alpha)$,则 MUE 切换成功的概率为

$$P_{\text{HO},m2a} = P\{vT_m < d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}\} = \frac{2}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{4R^2 - v^2 T_m^2}}{vT_m}\right) - \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) \right] \quad (7)$$

b) 当 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时, 有 $vT_m > d_{HF,m}$, 必然发生切换失败, 此时 MUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,m2b} = 0 \quad (8)$$

结合式(7)、(8), 在 $\sqrt{R^2 - r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 条件下 MUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,m2} = P_{HO,m2a} + P_{HO,m2b} = \frac{2}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{4R^2 - v^2 T_m^2}}{vT_m}\right) - \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) \right] \quad (9)$$

$$(3) vT_m < \sqrt{R^2 - r_m^2}$$

a) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时, 同理(2) a) 分析, MUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,m3a} = P\{vT_m < d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}\} = \frac{2}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{4R^2 - v^2 T_m^2}}{vT_m}\right) - \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) \right] \quad (10)$$

b) 当 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时, MUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,m3b} = P\{d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}, vT_m < d_{HF,m}\} = P\{d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}\} \times P\{vT_m < d_{HF,m}\} \quad (11)$$

由表 1 中 $d_{HF,m}$ 的定义及 α 的范围可得

$$P(vT_m \geq d_{HF,m}) = \int_{-\arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right)}^{\arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right)} \frac{d\alpha}{2 \arcsin(r_m/R)} = \frac{\arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right)}{\arcsin\left(\frac{r_m}{R}\right)}$$

且有

$$P(vT_m \geq d_{HF,m}) = \begin{cases} 1, & vT_m \geq \sqrt{R^2 - r_m^2} \\ 0, & vT_m < R - r_m \end{cases}$$

因此, 式(11)的概率为

$$P_{HO,m3b} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) - \arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right) \right], & R - r_m \leq vT_m < \sqrt{R^2 - r_m^2} \\ \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right), & vT_m < R - r_m \end{cases} \quad (12)$$

综上, $vT_m < \sqrt{R^2 - r_m^2}$ 条件下 MUE 切换成功的概率是

$$P_{HO,m3} = P_{HO,m3a} + P_{HO,m3b} =$$

$$\begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{vT_m}{2R}\right) - \arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right) \right], & R - r_m \leq vT_m < \sqrt{R^2 - r_m^2} \\ \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right), & vT_m < R - r_m \end{cases} \quad (13)$$

综合上述 3 种情况, MUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,m} = \begin{cases} P_{HO,m1} \\ P_{HO,m2} \\ P_{HO,m3} \end{cases} = \begin{cases} 0, & vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2} \\ \frac{2}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{4R^2 - v^2 T_m^2}}{vT_m}\right) - \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right) \right], & \sqrt{R^2 - r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2} \\ \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{vT_m}{2R}\right) - \arccos\left(\frac{v^2 T_m^2 + R^2 - r_m^2}{2vT_m R}\right) \right], & R - r_m \leq vT_m < \sqrt{R^2 - r_m^2} \\ \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{r_m}{\sqrt{R^2 - r_m^2}}\right), & vT_m < R - r_m \end{cases} \quad (14)$$

3.3.3 PUE 切换成功(PUE HO)的概率

根据 3.3 的分析, PUE 切换的前提是 MUE 成功从 Macrocell 切换到 Picocell, 成为 PUE, 然后 PUE 满足条件进行切换。并且几何图形分析, PUE 切换成功需满足 $vT_p < d_{HF,p}$ 。参考 3.3.2 节, PUE 切换成功概率分析如下, 记为 $P_{HO,p}$ 。

$$(1) vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$$

根据 3.3.2 节第(1)部分的分析可知, 在 $vT_m \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 条件下 $P_{HO,m} = 0$, 不满足 PUE 切换成功的前提条件。因此, 此种情况下 PUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,p1} = 0 \quad (15)$$

$$(2) \sqrt{R^2 - r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$$

a) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时, MUE 切换成功需满足 $vT_m < d(\alpha)$, PUE 切换成功需满足 $vT_p < d_{HF,p}$ 。因此有

$$P_{HO,p2a} = P\{\sqrt{R^2 - r_m^2} \leq vT_m < d(\alpha) < 2\sqrt{R^2 - r_m^2}, vT_p < d_{HF,p}\} \quad (16)$$

根据表 1 中 $d_{HF,p}$ 的范围, 可由 $vT_p < d_{HF,p}$ 得到

$$d(\alpha) < \frac{r_p^2 - R^2}{vT_p} - vT_p \quad (17)$$

因此式(16)的结果为

$$P_{HO,p2a} = P\left\{vT_m < d(\alpha) < \min\left(2\sqrt{R^2 - r_m^2}, \frac{r_p^2 - R^2}{vT_p} - vT_p\right)\right\} \quad (18)$$

b) 当 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2 - r_m^2}$ 时, 根据 3.3.2 分析, MUE 切换必然失败, PUE 切换的前提条件不满足, 则有

$$P_{HO,p2b} = 0 \quad (19)$$

综合式(16)、(19),在 $\sqrt{R^2-r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2-r_m^2}$ 条件下,PUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,p2} = P_{HO,p2a} + P_{HO,p2b} =$$
$$P\left\{vT_m < d(\alpha) < \min\left(2\sqrt{R^2-r_m^2}, \frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p\right)\right\}$$
$$(3) vT_m < \sqrt{R^2-r_m^2}$$
$$(20)$$

a) 当 $d(\alpha) < 2\sqrt{R^2-r_m^2}$ 时,结合 PUE 切换的前提条件,PUE 切换成功需满足的条件是 $vT_m < d(\alpha)$, $vT_p < d_{HF,p}$ 。因此,PUE 切换成功的概率为

$$P_{HO,p3a} =$$
$$P\left\{vT_m < d(\alpha) < 2\sqrt{R^2-r_m^2}, vT_m < \sqrt{R^2-r_m^2}, vT_p < d_{HF,p}\right\} =$$
$$P\left\{vT_m < d(\alpha) < \min\left(2\sqrt{R^2-r_m^2}, \frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p\right)\right\}$$
$$(21)$$

b) 当 $d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2-r_m^2}$ 时,结合 3.3.2 的分析,PUE 切换成功的条件是 $vT_m < d_{HF,m}$, $vT_p < d_{HF,p}$ 。根据表 1 定义的 $d_{HF,m}$ 的范围,由 $vT_m < d_{HF,m}$ 可得到

$$d(\alpha) < \frac{R^2-r_m^2}{vT_m} + vT_m$$
$$(22)$$

因此,由式(2)、(17)和(22)可得 PUE 切换成功的概率

$$P_{HO,p3b} = P\left\{d(\alpha) \geq 2\sqrt{R^2-r_m^2}, vT_m < d_{HF,m}, vT_p < d_{HF,p}\right\} =$$
$$P\left\{2\sqrt{R^2-r_m^2} \leq d(\alpha) < \min\left(\frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p, \frac{R^2-r_m^2}{vT_m} + vT_m, 2R\right)\right\}$$
$$(23)$$

结合式(21)、(23)可知, $vT_m < \sqrt{R^2-r_m^2}$ 条件下 PUE 切换成功的概率为

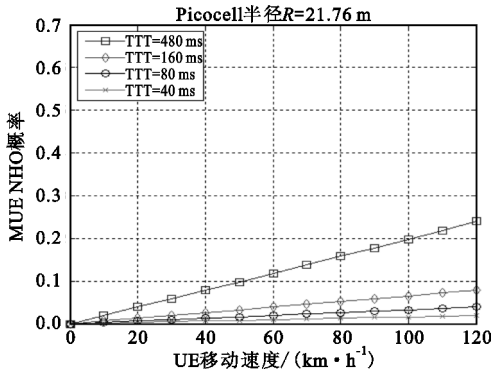
$$P_{HO,p3} = P_{HO,p3a} + P_{HO,p3b} =$$
$$P\left\{vT_m < d(\alpha) < \min\left(2\sqrt{R^2-r_m^2}, \frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p\right)\right\} +$$
$$P\left\{2\sqrt{R^2-r_m^2} \leq d(\alpha) < \min\left(\frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p, \frac{R^2-r_m^2}{vT_m} + vT_m, 2R\right)\right\}$$
$$(24)$$

综上所述,整个移动过程包括两次切换过程,总的 PUE 切换成功的概率为

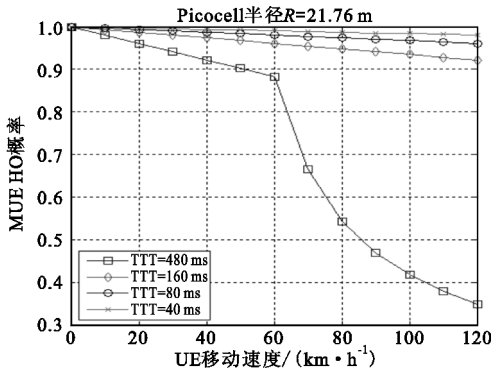
$$P_{HO,p} = \begin{cases} P_{HO,p1} \\ P_{HO,p2} \\ P_{HO,p3} \end{cases} =$$
$$\begin{cases} 0, & vT_m \geq 2\sqrt{R^2-r_m^2} \\ P\left\{vT_m < d(\alpha) < \min\left(2\sqrt{R^2-r_m^2}, \frac{r_p^2-R^2}{vT_p} - vT_p\right)\right\}, & \sqrt{R^2-r_m^2} \leq vT_m < 2\sqrt{R^2-r_m^2} \\ P_{HO,p3}, & vT_m < \sqrt{R^2-r_m^2} \end{cases}$$
$$(25)$$

4 仿真结果

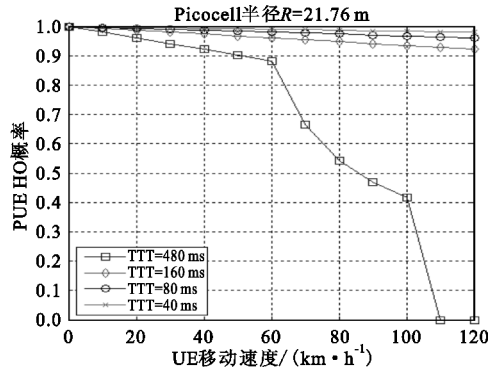
根据上述 UE 切换过程分析得到了 MUE NHO、MUE HO 和 PUE HO 的概率。图 6 显示的是宏/微微基站距离 d 为 250 m、Picocell 覆盖圆半径 R 为 21.76 m 时的切换概率仿真结果,图 7 显示的是宏/微微基站距离 d 为 125 m、Picocell 覆盖圆半径 R 为 9.60 m 时的切换概率仿真结果。仿真时假设模型中所有基站(eNBs 和 PBS)都是全向天线,忽略衰落和阴影的影响,假设切换偏置为 0 dB。



(a) MUE 不切换概率

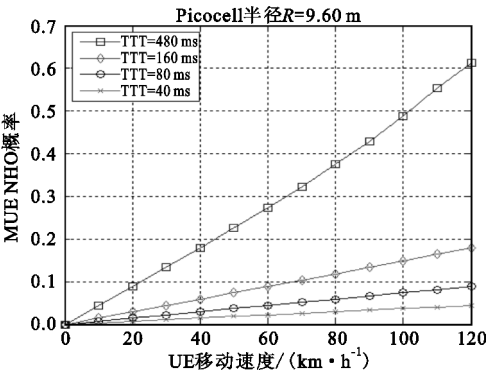


(b) MUE 切换成功概率

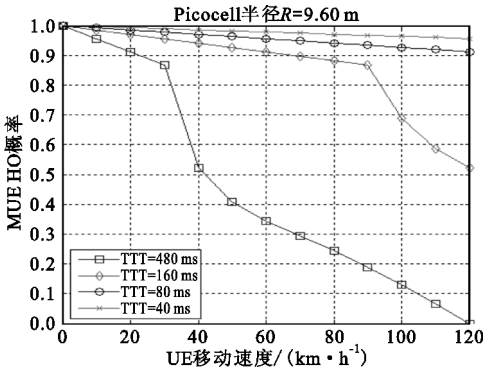


(c) PUE 切换成功概率

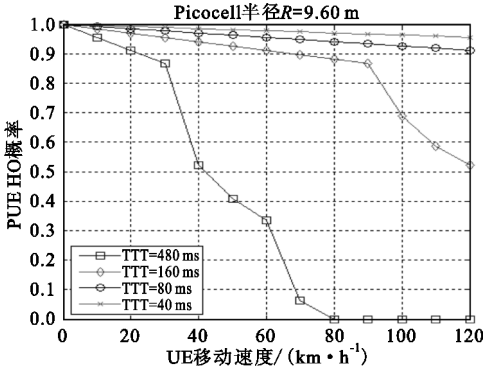
图 6 Macro-Pico 模型切换概率($d=250$ m, $R=21.76$ m)
Fig. 6 The handover rates of Macro-Pico model
($d=250$ m, $R=21.76$ m)



(a) MUE 不切换概率



(b) MUE 切换成功概率



(c) PUE 切换成功概率

图 7 Macro-Pico 模型切换概率($d=125\text{ m}$, $R=9.60\text{ m}$)
Fig. 7 The handover rates of Macro-Pico model
($d=125\text{ m}$, $R=9.60\text{ m}$)

从上述仿真结果可以看出,随着用户移动速度的增大,UE 切换成功的概率不断减小,并且在速度达到一定程度后, $vT_{m/p}$ 与切线弦长 $2\sqrt{R^2-r_m^2}$ 的大小关系发生变化,对切换的影响较大,如图 6(b)、(c)所示, v 大于 60 km/h 后 UE HO 概率下降幅度较大。其次,TTT 越大,切换成功概率越小,如图 6(b)所示,当 TTT=160 ms 时 MUE 切换成功的概率明显大于 TTT=480 ms 时的概率。这是因为随着 UE 速率或 TTT 的增大,在 TTT 时间内 UE 移出 Picocell 覆盖

圆的机率也增大,切换失败更容易发生。

另外,比较图 6 和图 7 可知,宏/微微基站间距 d 的大小也会影响 UE 切换成功的概率; d 越大,MUE 靠近 Picocell 覆盖圆边缘时获取到的 Macrocell 的信号质量越小,MUE 受到的信号干扰越小,相对而言,获取的 Picocell 的信号质量越强,切换成功的可能性就越大。

总之,用户移动速度、切换触发时间 TTT 和宏/微微基站间距 d 等都能够影响 UE 的切换。从上述图中可以看出,TTT 对切换概率的影响比较大, v 在达到一定程度后对切换影响较大。因此,在实际小区网络部署时要注意选择大小合适的 TTT 和基站间距 d ,最大化 UE 切换成功概率,确保无缝切换,保障通信的持续不间断。

5 结 论

LTE-A 异构网络是可有效解决移动通信系统扩展覆盖、增强容量和终端能耗效率等问题的关键技术之一,成为当前及未来移动通信技术研究的热点。在 LTE-A 的首个国家标准 3GPP LTE R10 中明确了对宏蜂窝、Pico 和 Femto 基站异构网的支持,在 2012 年 9 月启动的 3GPP LTE R12 中,异构网增强是其主要技术研究方向之一。

LTE-A 异构网络移动性管理直接影响网络 Qos (Quality of Service) 及用户体验,本文主要分析研究 Macro-Pico 网络模型下的切换这一关键技术问题,包括 Macro-to-Pico 切换和 Pico-to-Macro 切换两个切换过程。本文参考了文献[5],结合 3GPP 标准建立了 Macro-Pico 网络模型,分析两次切换过程中的 3 种切换成功概率,并且从正面直接明确地给出了用户移动速度 v 、切换触发时间 TTT 和宏/微微基站间距 d 各参数与 UE 切换成功的量化关系,对于实际场景下异构网络的部署和优化等有参考价值。

本文在研究过程中发现,频繁切换还可能引起乒乓效应,对切换成功有一定的制约作用,但研究较本文内容复杂。LTE-A 异构网络移动性管理作为 LTE-A 的核心技术,以后将在乒乓效应对切换的影响、协作通信等多种技术组合应用情况的切换分析等方面展开深入研究。

参考文献:

[1] Peng Yuefeng, Yang Wei, Zhang Yujian, et al. Mobility Performance Enhancements for LTE-Advanced Heteroge-

neous Networks [C] // Proceedings of 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Sydney, Australia; IEEE, 2012; 413-418.

[2] López-Pérez D, Güvenc I, Chu Xiao-li. Mobility Management Challenges in 3GPP Heterogeneous Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12) : 70-78.

[3] Yeh Shu-ping, Talwar S, Wu Geng, et al. Capacity and coverage enhancement in heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3) : 32-38.

[4] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Yong-bin, et al. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3) : 10-21.

[5] López-Pérez D, Güvenc I, Chu Xiao-li. Theoretical Analysis of Handover Failure and Ping-Pong Rates for Heterogeneous Networks [C] // Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Ottawa, Canada; IEEE, 2012; 6774-6779.

[6] 胡荣贻, 彭木根, 张洪岩, 等. LTE-Advanced 系统中的移动顽健性优化技术研究 [J]. 电信科学, 2013(5) : 84-89.

HU Rong-yi, PENG Mu-gen, ZHANG Hong-yan, et al. Mobility Robustness Optimization in LTE-Advanced System [J]. Telecommunications Science, 2013(5) : 84-89. (in Chinese)

[7] 赵季红, 李洋, 曲桦, 等. LTE-Advanced 系统中基于载波聚合的联合切换方案 [J]. 电信科学, 2012(6) : 33-41.

ZHAO Ji-hong, LI Yang, QU Hua, et al. A Combined Handover Scheme Under CA Mode in LTE-Advanced [J]. Telecommunications Science, 2012(6) : 33-41. (in Chinese)

[8] 祝炜凯, 赵竹岩, 康剑锋, 等. 基于实际城区场景的 TD-LTE 异构网络性能研究 [J]. 电信科学, 2012, 28(9) : 47-51.

ZHU Wei-kai, ZHAO Zhu-yan, KANG Jian-feng, et al. Research on TD-LTE Heterogeneous Network Performance in a Realistic Metropolitan Scenario [J]. Telecommunications Science, 2012, 28(9) : 47-51. (in Chinese)

[9] López-Pérez D, Güvenc I, Roche G, et al. Enhanced Inter-Cell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3) : 22-31.

[10] 3GPP TR 36.839(V11.1.0), Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks [S].

[11] Larson R C, Odoni A R. Urban Operations Research [M/OL]. NJ: Prentice Hall, 1981 [2013-10-22]. http://web.mit.edu/urban_or_book/www/book/chapter3/3.3.2.html.

作者简介:



余翔(1964—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信系统;

YU Xiang was born in Chongqing, in 1964. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns wireless communication system.

张丽(1989—), 女, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线移动通信;

ZHANG Li was born in Hubei Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns wireless mobile communication.

Email: zhangli890930@163.com

王蓉(1981—), 女, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为无线通信。

WANG Rong was born in Chongqing, in 1981. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns wireless communication.

本刊定价调整通知

因各项成本的增加,为了保障期刊的正常出版,经研究决定,从2014年1月起,本刊定价由现在的20.00元调整为30.00元。

本刊编辑部