



一种基于 femtocell 群的缓存切换策略的研究^{*}

赵季红^{1,2}, 王 勋², 栾智荣¹

(1. 西安交通大学电子信息工程学院 西安 710049;

2. 西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710061)

摘 要: 为了提高局部室内无线通信质量, 家庭基站正逐步应用于各类室内无线通信场景。在密集部署 femtocell 场景中, 当用户设备由宏小区层切换至 femto 层时, 密集的 femtocell 信号会影响用户设备切换的准确性, 增加用户设备切换开销和不必要切换概率。针对上述问题, 在密集部署 femtocell 环境下针对切换提出一个 femtocell 分集理念, 在提高切换准确性的同时, 降低不必要切换次数, 并在此基础上提出了一种缓存切换策略, 以提高设备由宏小区层切换至 femto 层的效率, 通过仿真对所提机制的性能进行了验证。

关键词: 家庭基站; 异构网络; 切换

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.10.009

A Femtocell Cluster Based Cache Handover Strategy

Zhao Jihong^{1,2}, Wang Xun², Luan Zhirong¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Telecommunications and Information Engineering, Xi'an University of

Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: To improve the quality of indoor wireless communication, the femtocell begins to be deployed in different indoor wireless communication scenarios. In the densely deployed femtocell network, when users handover from the macrocell to the femtocell, the multiple RSRP from different femtocell seriously affect the accuracy of the handover process. To solve above problems, the idea of femtocell cluster was proposed to improve the handover accuracy and reduce the unnecessary handover. In addition, a cache handover strategy was proposed to improve the efficiency of handover from macrocell to femtocell. Simulation results verify the proposed algorithms and strategies.

Key words: femtocell, heterogeneous network, handover

1 引言

家庭基站(home eNode B 或 femtocell)是一种家用小型基站,能够提高室内通信质量,解决宏基站在室内通信中存在的覆盖盲区问题。对于一个蜂窝移动通信系统,macrocell 和 femtocell 形成了一种两层的异构网络结构,其

中 macrocell 主要负责提供室外信号覆盖,femtocell 主要提供室内信号覆盖。根据建筑物的结构特点和用户的分布特点,在某些区域(如宿舍、商场),一个 macrocell 的覆盖范围内会密集部署大量 femtocell。这种网络结构在提升室内通信质量的同时也带来了新的技术挑战。

如何有效切换,是 macrocell/femtocell 异构网络所要面

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61372092),国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”基金资助项目(No.2011ZX03005-004, No.2012ZX03001029-003, No.2012ZX03001008-003)



临的重要技术挑战之一。本文主要研究用户设备(UE)由 macrocell 切换至密集部署 femtocell 场景。在一个 macrocell/femtocell 场景中, 对于一个与 macrocell 连接的 UE, 当 femtocell 的信号强于 macrocell 时, UE 需要切换至信号强度较好的基站, 以保证服务质量(假设 femtocell 的接入模式是 open access, 即所有用户都能够接入)。在 femtocell 密集部署场景, 当 UE 接收到来自周围大量 femtocell 的信号时, UE 需要浏览其附近所有 femtocell 的频率资源, 然后搜寻最合适的扰码, 进而选择最合适的基站进行接入。具体来说, 当 UE 连接至某个小区后, 它需要监听该基站的广播信息, 包括邻区列表小区的信息(频率和扰码等)。根据小区信息, UE 重复测量相邻小区的信号强度, 如果其当前连接的小区信号强度太弱, UE 则会选择切换至一个信号强度较好的小区。UE 由 macro 层切换至 femto 层是一个复杂的过程, 因为一个宏基站的范围内覆盖有大量 femtocell, 其数量远超过基站邻区列表所限定的最大值(32)^[1-4], UE 需要自行检测所有可能被切换到的 femtocell。因此在该场景下, 传统的切换方法会增加切换的开销, 同时还会导致过多不必要的切换。

本文针对 UE 由 macrocell 切换至 femtocell 场景中主要存在的开销大、不必要切换次数多等问题, 提出了一种 femtocell 候选切换集合理念, 并在此基础上提出了一种切换缓存策略, 使 UE 在切换过程中能够根据其存储的基站信息直接选择已缓存的附近 femtocell, 从而提高切换效率, 减少不必要的切换次数和设备开销。

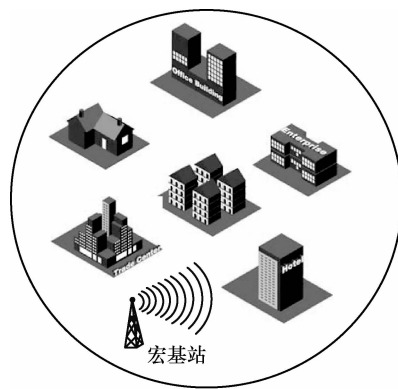
2 femtocell 候选切换集合设计

对于社区、学校、商场、写字楼等用户密集区域, 用户可以根据室内通信需求部署 femtocell, 这导致了 femtocell 部署的随机性。femtocell 部署的随机性降低了 UE 切换的有效性。本文提出利用各基站的地理位置和环境信息, 将大量无规律部署的 femtocell 构建成一个个相对独立的集群, UE 在切换前先选定某个 femtocell 群, 从而增强切换的有效性^[2]。

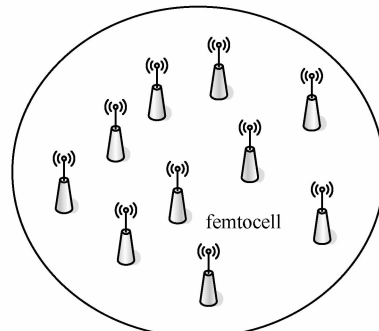
2.1 femtocell 候选切换集合设计理念

传统切换过程要求 UE 确定具体的某一个待切换基站, 对于密集部署 femtocell, 这种切换对准确性要求较高, 开销也较大, 同时被选中的基站可能不符合切换条件而导致设备需要重新选择另外一个适合的基站。在密集型 femtocell 网络中, 要从某一覆盖范围内大量随机的 FAP

(femtocell accessing point, 家庭基站接入点) 中选择一个合适的接入点进行接入, 利用传统方法的效果很差。本文中, 笔者充分利用装置有 femtocell 的建筑物的地理位置信息, 以一个宏小区内某个位置的一栋建筑或者几栋相邻建筑为单位, 将其中的 femtocell 组成一个 femtocell 候选切换集合。每个集合有自己的地理坐标信息以及编号信息, 该集合内的各个 femtocell 亦设置相关的识别信息, 宏基站和 RNC(无线网络控制器)可以存储这些信息, 这种设计方法能够重新编排用于切换的邻区列表, 简化邻区列表的复杂度。同时, 针对 femtocell 接入模式, 设计了一种自适应的接入方式。当 femtocell 在接收到系统发送的切换请求时, 根据自身无线资源状态分配一部分频谱资源给非授权用户。当 UE 接收到的来自宏基站的信号相较于 femtocell 信号弱时, 系统根据移动性预测机制选择 UE 即将进入的候选切换集, 该群内的 femtocell 则作为切换候选基站, 避免来自其他 femtocell 群的 FAP 的干扰。该方案如图 1 所示。图 1(a) 为覆盖了大量 femtocell 的 macrocell 通信场景示意; 图 1(b) 为由若干密集部署 femtocell 构建的 femtocell 的候选切换集合示意。



(a) 覆盖了大量 femtocell 的 macrocell 通信场景



(b) 一个由若干密集部署 femtocell 构建的 femtocell 的候选切换集合

图 1 femtocell 候选切换集合设计

2.2 控制管理单元设计

本文在 RNC 内设计一个控制单元 (假设某 RNC 控制范围内一共有 k 个候选切换集合), 里面存储该宏蜂窝网络小区内各候选切换集的信息, 这样所有小区的信息都能被有效调度。该控制单元结构如图 2 所示。该管理控制单元的设计也使邻区列表形成了一定的规律性, 不再是所有 femtocell 杂乱无章地排列, 而是宏基站附近的小型基站都有自己的归属集合, 也有相应的编号信息, 因此便于管理和选择, 也使得后面的缓存策略中基站信息的存储更具有条理性。

2.3 不同 femtocell 群数量下切换次数对比仿真

为有效地考察本文设计机制对于性能与效率的影响, 仿真中通过改变 femtocell 切换候选集的规模观察候选切换集对切换效率的影响。假设一个 macrocell 覆盖区域内密集部署 1 000 个 FAP, 将这些 FAP 分为 5 个、10 个、30 个切换集合。

图 3 为在移动设备以不同速度运动时, 分别在不采用候选切换集方案以及设定 5 个、10 个和 30 个候选切换集时, UE 在切换候选集个数不同的情况下从 macrocell 切换至 femtocell 的次数。可以看出, 在一定的速度范围内, 移动设备的速度越快, 切换次数越多。此外, 采用候选切换集之后, 以同样速度运动的 UE 在网络间切换的次数明显减少。通过仿真可以发现, 当切换候选集设定为 30 个时, 切换次数较前者又有所上升, 这是因为如果候选切换集合设置得过多、过密, 设备会在一定时间内在多个切换候选集中移动, 根据本文提出的切换准则, 其所触发的切换则会相应增多。所以设定一个合适的候选切换集合数量也是非常重要的, 否则会使系统性能降低。由此可以看出, 本文设计的基于候选切换集的机制免除了一些不必要的切换, 提高了移动设备运行效率。

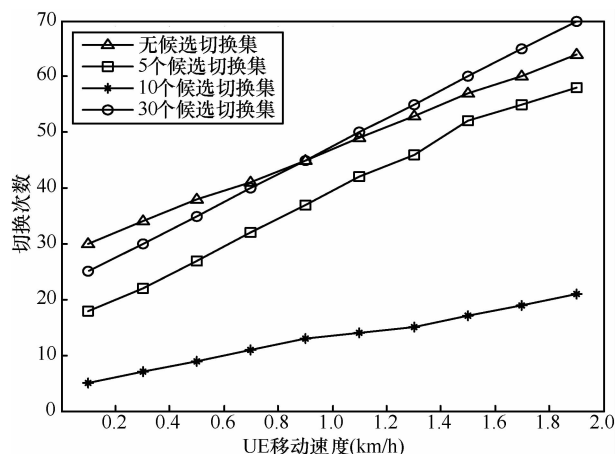


图3 UE在不同数量候选切换集下的网间切换数量对比

3 基于用户习惯的 femtocell 选择缓存策略

UE 从 macro 层切换至密集部署 femtocell 网络时, 需要检测大量不同 femtocell 的参考信号, 切换开销较大。针对此问题, 本文提出了一种切换缓存策略提高切换的效率。缓存的目的在于针对用户经常去的某个地方, 比如其工作场所、常去的饭店和商场等, 当其接入某个适合的 femtocell 时, UE 则将该 femtocell 的信息保存下来作为设备缓存区的条目之一, 当下次用户再朝这些场所移动时, 便可以直接选定其设备缓存的 femtocell 进行切换, 如果该区域内 UE 缓存的 femtocell 正处于非工作状态或者因为别的原因不通过 UE 的鉴权请求时, UE 则再通过其他机制选择合适基站进行切换。

3.1 缓存策略描述

该缓存机制的主要原则与计算机缓存或基站路由中用到的最近最少使用 (LRU) 算法相似^[9]。设计一个 UE 缓存单元以存储该 UE 最近从 macrocell 切换至 femtocell 时所访问的 femtocell 的信息。每一个缓存条目的大小不能超过 28 byte。

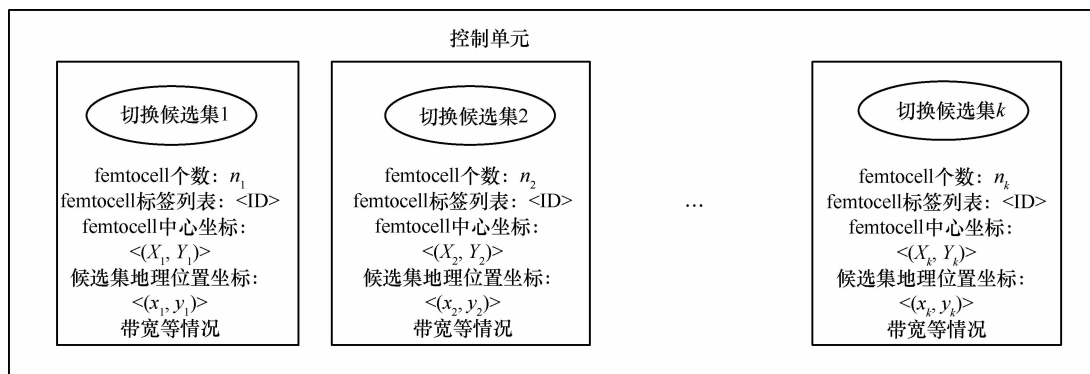


图2 控制单元基本信息结构



当 UE 接近某个 femtocell 候选切换集时, UE 首先搜索缓存中最常访问的 femtocell。缓存容量的设定非常重要,既要保证最近最常访问的 femtocell 都能存储在该缓存单元中,又不能消耗太多的内存。在小区切换过程中,在某个 FAP 被选中之前,需要知道候选 FAP 的数量。令 $P_i[n]$ 为 UE 从 macro 层进入某一 femto 层的概率,设备先选定当前的 femtocell 群,且假设该群内被缓存的 FAP 个数为 N 。再假设该区域中存储于 UE 缓存内的 FAP 在缓存条目中的第 n 个被发现,且总的缓存容量 $X \geq N \geq n$ 。在此情形下,视 UE 成功接入缓存的 FAP 所需的开销为 n 。令 M 为当前候选 FAP 的数量,根据上述方案可知该值为一变量。如果缓存的 FAP 未被成功选定,则 UE 所要浏览的剩余 femtocell 的最大数量应为 $M-N$,因此根据均匀随机假设,其平均浏览开销为 $\frac{M-N}{2}$ 。所以该情形下切换至合适 FAP 所需的开销应为:

$$N + \frac{M-N}{2} = \frac{M+N}{2} \quad (1)$$

由此可推出其期望开销 C 的一般表达式为:

$$C = \sum_{i=1}^N n P_i[n] + \left(\frac{M+N}{2} \right) \left(1 - \sum_{i=1}^N P_i[n] \right) \quad (2)$$

由于检测一个 femtocell 的参考信号强度需要大约 180 ms,因此此切换的期望时延为 $180 \times C$ ms。对于某个即将进入 femto 覆盖区域的 UE 来说,概率 $P_i[n]$ 可根据移动性预测技术追踪 UE 的运动历史获得。

对于提出的缓存切换策略,可以用如图 4 所示的简单流程表示。

3.2 3 种移动模型

通常在城市人群密集区,道路两旁有很多建筑,根据地理环境信息,通常位于街道两旁的建筑内的家庭基站按照本文提出的候选切换集理论应属于不同的集合。此外,在某个特定的候选切换集内,UE 的移动也得分不同的情况。因此基于地理环境,本文主要考虑 UE 的如下 3 种移动模型。

(1) 在一维运动空间,设 UE 向右移动的概率为 p ,则向左移动的概率为 $1-p$,其运动模型可描述为用户在街道上行走,当到某个地点时,向路的左边或右边移动。此场景下 UE 切换至合适 FAP 的开销记为 C_1 。

(2) 在一维运动空间,设 UE 往回移动的概率为 p ,即 UE 返回其当前服务基站的概率为 p 。也就是说,如果上一刻用户在路上是向前或者向右移动,则下一步其往后或者往左

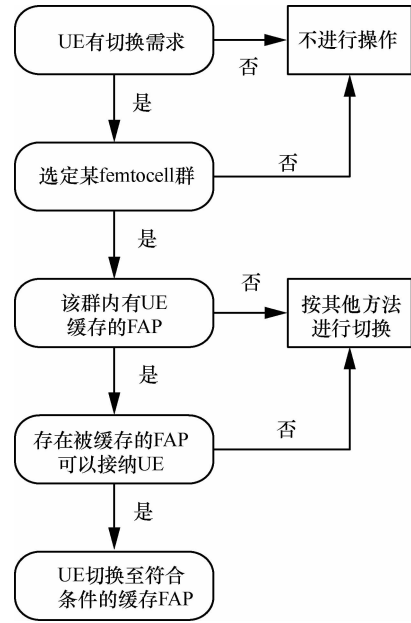


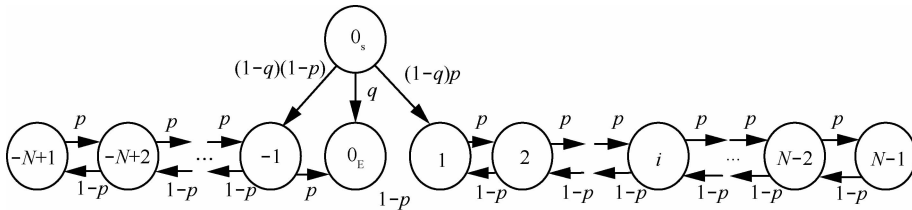
图 4 缓存切换策略简单流程

移动的概率为 p ,而继续原来移动方向的概率则为 $1-p$ 。此场景下 UE 切换至合适 FAP 的开销记为 C_2 。

(3) 在二维运动空间,设 UE 往回移动的概率同样为 p ,建筑物的布局符合曼哈顿模型(即网格结构,UE 朝 4 个方向中的 1 个移动)。UE 返回其当前服务基站的概率为 p ,朝其他 3 个方向基站移动的概率均为 $\frac{1-p}{3}$ 。此场景下 UE 切换至合适 FAP 的开销记为 C_3 。

在这里通过对第一种模型进行分析来推导出 $P_i[n]$ 的值^[5],其分析模型可以证实对模型 1 的仿真结果的有效性,然后再扩展至对模型 2 和模型 3 的仿真。

在模型 1 中,房屋位于街道两旁,构成一条直线,将该直线标记为 i ,且 UE 按照图 5 所示的状态转移模型访问这些覆盖有 femtocell 的房屋。令 HNB_i 表示房屋 i 中被 UE 缓存的基站。在图 5 中,状态 i 表示 UE 停留在房屋 i 内的 femtocell 的覆盖范围内,但不包括用 0_s (起始状态)和 0_e (结束状态)描述 UE 位于位置 0 覆盖范围下的行为。假设 UE 初始驻留于位置 0 的基站覆盖范围内。UE 开始移动时,可能进入其他 femtocell 覆盖区域,也可能返回原基站覆盖区域。当其返回时,它又重新访问原服务基站(即状态转移为 0_s 到 0_e),概率为 $q(0 \leq q \leq 1)$ 。它进入 1 号 femtocell(即从 0_s 到 1)的概率为 $(1-q)p$,进入 -1 号 femtocell(即从 0_s 到 -1)的概率为 $(1-q)(1-p)$,其中 $0 < p < 1$ 。对于 $-N < i \neq 0 < N$,UE 进入 $i+1$ 号 femtocell 的概率为 p ,进入 $i-1$ 号 femtocell 的概率


 图 5 UE 向右移动概率为 p 时的状态转移 ($N \geq 2$)

为 $(1-p)$ 。在该模型中, $P_i[n]$ 可理解为从 0 号基站出发, UE 在返回起始位置之前, 访问过 $n-1$ 个不同 femtocell 的概率。可以看出, 有两种一维空间的随机行走方式: 第一种经过的状态为 $(0_E, 1, 2, \dots, N-1)$, 最终状态为 0_E 或 $N-1$ 状态; 第二种经过的状态为 $(0_E, -1, \dots, -N+1)$, 最终状态为 0_E 或 $-N+1$ 。

考虑上述第一种情况, 其中 $N \geq 2$ 。记 $\mu_k(p, n)$ ($1 < n \leq N$) 为从 k ($0 \leq k \leq n-1$) 号 femtocell 起始的概率 ($0 \leq k \leq n-1$), UE 至多访问 $n-1$ 个不同 femtocell, 且在其访问 0 号基站之前能到达 $n-1$ 号 femtocell 的覆盖范围。对于 $0 < k < n-1$, 可以得到式 (3):

$$\mu_k(p, n) = p\mu_{k+1}(p, n) + (1-p)\mu_{k-1}(p, n) \quad (3)$$

且很明显存在:

$$\mu_0(p, n) = 0, \mu_{n-1}(p, n) = 1 \quad (4)$$

由图 5 可清楚知道 $\mu_1(p, 1) = q$ 。对于 $n > 1$, 通过求解方程式 (3) 和式 (4) 可得到:

$$\mu_1(p, n) = \begin{cases} \frac{n-1}{n}, & p=0.5 \\ \frac{P^{n-1}(1-p) - (1-p)^n}{P^n - (1-p)^n}, & p \neq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

类似地, 对于上述第二种情况, 可通过式 (4) 得出概率 $\mu_1(1-p, n)$ 的值。对于 $n=1$, $P_1[1] = \mu_1(p, 1) = q$ 。而对于 $n > 1$, 由式 (5) 以及如图 5 所示的状态转移图可知:

$$P_i[n] = (1-q)\{p[\mu_1(p, n) - \mu_1(p, n-1)] + (1-p)[\mu_1(1-p, n) - \mu_1(1-p, n-1)]\} = \begin{cases} \frac{1-q}{n(n-1)}, & p=0.5 \\ \frac{2(1-q)(2p-1)^2(1-p)^{n-1}p^{n-1}}{[p^{n-1} - (1-p)^{n-1}][p^n - (1-p)^n]}, & p \neq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (1) 中, 可计算出 C_1 为:

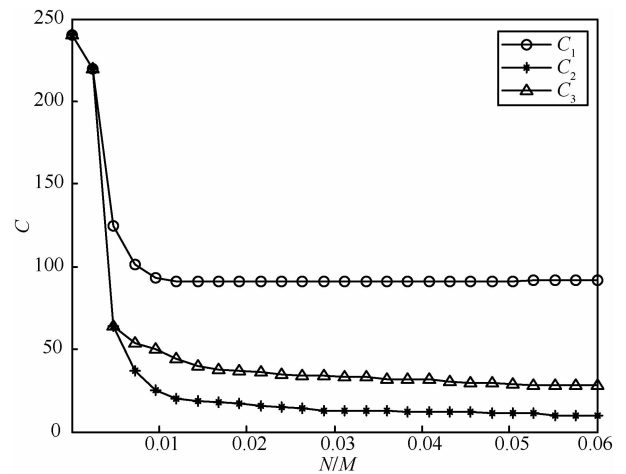
$$C_1 = q + \frac{(M+N)(1-q)}{2} - \begin{cases} (1-q) \left\{ \sum_{n=2}^N \left[\frac{M+N-2n}{2n(n-1)} \right] \right\}, & p=0.5 \\ (1-q)(2p-1)^2 \left\{ \sum_{n=2}^N \frac{(M+N-2n)(1-p)^{n-1}p^{n-1}}{[p^{n-1} - (1-p)^{n-1}][p^n - (1-p)^n]} \right\}, & p \neq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

4 缓存策略的仿真结果与分析

仿真验证了所提出算法的性能, 在这里假设概率 p 和 q 分别等于 0.7 和 0.1。

图 6 给出了 N/M 的值对于开销 C 的影响效果, 在这里取 $M=300, p=0.7$ 。由图 6 可以看出, 在模型 1 中, 随着 N/M 值的增加, C_1 的值先急速下降, 然后又缓慢上升。当 N/M 的比值很小时, 增加 N 的大小能一定程度上捕捉到 UE 的位置。然而, 这里取 $p=0.7$ 表明 UE 趋向于向右移动,

当 $N \geq 1$ 时, UE 的位置会有 $1 - \sum_{n=1}^N P_i[n]$ 的概率永远不被捕捉到, 这对 C_1 的值会产生影响, 并会在 N 增大到一定程度时使得 N/M 变成增函数。图中的曲线表明, 即使 UE 只朝一个方向移动, 小的缓存空间 (比如只占 M 的 0.01) 仍可以对切换过程带来益处。


 图 6 不同用户移动模型下 N/M 值对于 C 值的影响

在模型 2 和模型 3 中, 当 N 的取值很小时, 开销 C_2 和 C_3 随着 N/M 的增加会明显降低。这一现象表明增加缓存空间大小可以有效地捕捉 UE 的位置。当 N 的值很大时, 由仿真结果可以看出, 继续增大 N 的值, 开销减小的程度很低, 带来的收益很小。当 $N \approx 0.05M$ 时, UE 几乎可以一直发现其缓存空间里的目标 FAP, 因此再增大缓存容量则不



能有效提高命中率。

由上述分析可知,为了有效发挥缓存对于切换性能带来的作用,缓存容量的大小大约为 $0.01M$ 时,是最合适的。例如 M 为 300 时,缓存容量为 3 就能带来良好的性能。

5 结束语

femtocell 技术有光明的应用与市场前景,为室内用户提供了低资费、高质量的网络接入,同时减少了整个网络系统的负担。但由于 femtocell 的覆盖范围较小,部署十分密集,因此 UE 在 macro 层至 femto 层之间的切换需要深入研究,避免不必要的切换发生以及减少切换开销。本文设计了候选切换集的策略,并在 femtocell 群的基础上提出了一种缓存切换策略,通过仿真实验表明,笔者提出的机制可以有效减少切换次数,降低了设备的开销。本文提出的切换策略为今后 femtocell 网络部署的研究提供了一个值得深入探讨的方向。

参考文献

- 1 3GPP TS 25.133 V9.0.0. Requirements for Support of Radio Resource Management (FDD), June 2009
- 2 Zhao J H, Wang X, Qu H. Researches on the manageable handover mechanism in macrocell/femtocell hierarchical network. Proceedings of 2012 IET International Conference on Information

Science and Control Engineering, Shenzhen, China, 2012

- 3 Yang S R, Lin Y C, Lin Y B. Performance of mobile telecommunications network with overlapping location area configuration. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2):1285~1292
- 4 3GPP TS 22.220 V11.2.0. Service Requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB), June 2011
- 5 Huang D W, Lin P, Gan C H. Design and performance study for a mobility management mechanism (WMM) using location cache for wireless mesh networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5):546~556

[作者简介]



赵季红,女,西安交通大学博士生导师,西安邮电大学兼职教授,多年来主要从事宽带通信网络的基础理论研究及应用开发工作。

王勋,男,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为移动互联网、无线资源管理。

栾智荣,男,西安交通大学博士研究生,主要研究方向为无线异构网、无线资源管理。

(收稿日期:2013-06-13)

· 简讯 ·

4 Mbit/s 以上宽带接入用户比例达 3/4

2013 年 1-9 月,全国电信业实现电信业务总量 10 409.2 亿元,同比增长 7.8%,比上月回落 0.1 个百分点,实现电信业务收入 8 708.8 亿元,同比增长 8.6%。电话用户总数净增 8 664.7 万户,达到 14.77 亿户。

移动电话用户总数突破 12 亿户,3G 用户占比突破 30%。1-9 月,移动电话用户净增 9 439.8 万户,总量突破 12 亿大关,达到 12.07 亿户。2G 用户向 3G 迁移加快,1-9 月,3G 用户净增 13 479.4 万户,超过 2012 年移动电话用户的全年净增规模,平均每月新增近 1 500 万户。总数达到 3.68 亿户,占移动电话用户总数的比重达到 30.5%,比上月提升 1.1 个百分点,其中 TD-SCDMA 用户对新增 3G 用户的贡献达到 60.2%,每净增 10 个 3G 移动用户中,6 个为 TD-SCDMA 用户。

宽带接入速率持续提升,城乡宽带用户差距进一步缩小。1-9 月,基础电信企业互联网宽带接入用户净增 1 595.4 万户,达 1.86 亿户。“宽带中国”战略出台后,各基础电信企业继续加快宽带提速升级。4 Mbit/s 以上宽带接入用户占宽带用户总数的比重达到 75.4%,分别比 2012 年年末、6 月底提高 9.6、3.1 个百分点。光纤接入 FTTH/FTTO 用户新增 1 481.0 万户,总数达到 3 519.1 万户,占宽带用户总数的比重达到 18.9%,预计年底将突破 20%。传统 xDSL 用户逐步向光纤接入迁移,截至 9 月底,xDSL 用户比 2012 年末共减少 377 万户。农村地区宽带业务快速发展,城乡差距进一步缩小。1-9 月农村地区宽带接入用户达到 4 645.7 万户,新增 596.9 万户,城市和农村宽带用户比例由 2012 年同期的 3.31:1 缩小到 3:1。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)