

## 一种分层蜂窝网中基于用户分类的建模分析方法

刘 莉 荆 涛 付 立

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

**摘 要:** 随着无线网中用户需求的业务量持续增大,且用户具有不同移动性,分层蜂窝结构(HCS)被提出。该文研究一种微小区/宏小区的双层蜂窝结构的网络性能,此系统采用双向溢出策略,呼叫用户根据其速度选择合适的接入层(慢用户接入微小区,快用户接入宏小区)。该文提出一种用户分类建模分析方法(分为快用户和慢用户)来估计分层蜂窝网络性能,它不同于以往的蜂窝层分类(分为微小区层和宏小区层)建模方法。此用户分类模型包括一个快用户模型和一个慢用户模型,两个模型都是简单的一维马尔可夫过程。理论分析和仿真结果都证明了用户分类分析模型的正确性。随后利用此模型分析了为速度阈值的作用和被阻用户重复呼叫情况下的网络性能。

**关键词:** 无线分层蜂窝网; 用户分类建模; 马尔可夫过程; 溢出

中图分类号: TN919.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2235-04

## A User-Classified Method for Modeling and Analysis of Hierarchical Cellular Networks

Liu Li Jing Tao Fu Li

(Institute of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** As continuing growth in traffic volume from users with varying degrees of mobility in wireless networks, a Hierarchical Cellular Structures (HCS) has been suggested. In this paper, the performance of a two-tier microcell/macroc cell cellular system with bidirectional call-overflow scheme is studied, where cell selection in hierarchical architecture is based on the velocity of the mobile making the calls. Different from the general layer-classified (macrocell and microcell) analysis, a user-classified (fast and slow) modeling method is developed for evaluating the performance of such systems. The user-classified models consist of a fast user model and a slow user model both of which are simple one-dimension Markov process transition diagrams. Theoretical analysis and numerical evaluation show that the analytical models are reliable. Furthermore, effect of velocity threshold and blocked call repeat phenomenon using the models are examined.

**Key words:** Wireless hierarchical cellular structures; User-classified modeling; Markov process; Overflow

### 1 引言

无线移动业务的不断增加使得蜂窝尺寸不断减小。然而由于蜂窝尺寸的减小,呼叫在漫游区域的切换次数也随之增多。在此情况下,分层蜂窝网结构被提出<sup>[1-8]</sup>,随即成为研究热点。

分层蜂窝网结构是将蜂窝网络分层,上层是较大覆盖范围的蜂窝小区,下层是较小覆盖范围的蜂窝小区,上层覆盖下层。关于分层蜂窝网结构,已经有多种设计技术和分析方法被提出<sup>[1]</sup>。Anpalagan提出一种分层蜂窝结构<sup>[2]</sup>,下层为微小区,上层的宏小区再分为多层,并依据用户速度选择接入层。另外, Han 和 Klein提出两种接入层选择策略,速度选择策略和业务选择策略,但其结论是在用户速度很小以至忽略切换呼叫前提条件下得到的。通常新呼叫和切换呼叫的到达被假设为泊松过程<sup>[4,5]</sup>,仅允许从下层到上层方向的业务量溢出,这使得快慢用户没有被公平对待。Shan证明双向溢

出策略能较大地提高系统性能<sup>[6]</sup>。虽然将溢出业务流假设为泊松过程<sup>[4-6]</sup>使得分析简单,但泊松过程不能捕获业务量的突发特性,更加准确地分析模型是将溢出业务流假设为间断泊松过程(IPP)<sup>[7,8]</sup>,由此建立的微小区/宏小区分析模型为多维马尔科夫调制的泊松过程,分析比较复杂。

本文分析一种双层蜂窝网,上层的每一个宏小区覆盖下层的  $N$  个微小区。为了分析此系统的性能,提出了一种用户分类的分析模型方法,建立了一个快用户模型和一个慢用户模型,它们都是一维马尔科夫过程,比通常使用的宏小区模型和微小区模型分析简单。快(慢)用户模型包含了宏小区和微小区的所有快(慢)用户,也就是说宏小区和微小区在本文的分析模型中相互结合,此模型考虑了上下层的相关性,因此提高了准确性。另外,在分析系统性能时,也考虑的许多因素,包括用户移动速度,蜂窝小区半径,平均切换次数等。理论分析和仿真结果都显示了本文提出的用户分类模型能够简单准确地估计系统性能。

本文其他部分组织如下:下一节描述了模型建立的前提

条件, 第 3 节是快(慢用户)模型的详细分析, 第 4 节是用户分类分析方法的仿真实验比较评价, 最后是结束语。

### 2 模型建立的前提条件

模型建立的一些前提条件如下:

(1)新呼叫用户根据其运动速度选择接入层。速度大于速度阈值的用户被认为是快用户, 接入上层宏小区; 否则被认为是慢用户, 接入下层微小区。

(2)系统同时应用溢出和回流策略。当微小区没有可用信道时, 慢用户可以使用上层宏小区的空闲信道(溢出)。当慢用户到达宏小区边缘需要切换时, 一旦微小区有可用资源它便立刻回到下层小区(回流)。快慢用户可以分别从上下层双向溢出, 共同分享上下层的所有信道。

(3)分层蜂窝网中的用户分布均匀。上层宏小区被下层  $N$  个微小区完全覆盖, 没有仅被宏小区或仅被微小区覆盖的区域。

(4)每层蜂窝的新呼叫和切换呼叫到达都是泊松过程, 即快(慢)用户的呼叫到达是泊松过程。快(慢)用户的新呼叫到达率均值、快用户在宏小区(微小区)的切换呼叫到达率均值和慢用户在微小区(宏小区)的切换呼叫到达率均值分别为  $\lambda_0^n(\lambda_1^n)$ ,  $\lambda_0^h(\lambda_{10}^h)$  和  $\lambda_1^h(\lambda_{01}^h)$ 。

(5)快(慢)用户的呼叫持续时间服从负指数分布, 均值为  $\mu_0^{-1}(\mu_1^{-1})$ 。

(6)用户在一个蜂窝小区的逗留时间服从负指数分布。快用户在宏小区(微小区)的逗留时间均值、慢用户在微小区(宏小区)的逗留时间均值分别为  $\eta_0^{-1}(\eta_{10}^{-1})$  和  $\eta_1^{-1}(\eta_{01}^{-1})$ 。

(7)分层蜂窝网的信道分配固定。  $n_0$  和  $n_1$  分别表示一个宏小区和一个微小区的信道数。

### 3 分层蜂窝网的分析和建模

#### 3.1 快用户业务的分析建模

在双向溢出策略中, 快用户和慢用户可以分享上层和下层蜂窝的所有信道, 因此双层分层蜂窝网的快用户业务模型包括宏小区层和微小区层两部分, 它可以通过一维马尔可夫过程来描述, 如图 1 所示。此模型中宏小区部分的状态  $i$  表示在一个宏小区内的快用户数为  $i$ , 微小区部分的状态  $i$  表示在这个宏小区和它覆盖区域内的一个微小区的快用户总数为  $i$ , 状态稳态概率表示为  $\pi_0^i$ , 其中  $0 \leq i \leq n_1 + n_0$ 。本文假设一个呼叫占用一个信道的简单情况。当所有的快用户都在宏小区层中, 也就是没有快用户溢出到微小区层时, 呼

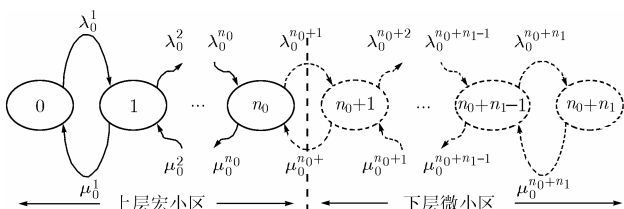


图 1 快用户呼叫业务的一维马尔可夫状态模型

叫到达率均值为  $\lambda_0^i = (\lambda_0^n + \lambda_0^h)P_{1pass}^i$ , 其中  $1 \leq i \leq n_0$ ,  $P_{1pass}^i$  表示系统中快用户可以占用不小于  $i$  个信道的概率, 显然它与慢用户占用信道的情况有关, 我们将在下节进行分析。

当上层宏小区的信道被占满, 快用户呼叫业务溢出到下层微小区, 溢出到一个微小区的快用户呼叫业务到达率服从指数分布<sup>[7,8]</sup>, 其均值为  $\lambda_0^i = ((\lambda_0^n + \lambda_{10}^h)/N)P_{1pass}^i, n_0 + 1 \leq i \leq n_0 + n_1$ 。通过解马尔可夫状态的稳定状态方程和归一化条件  $\sum_{i=0}^{n_0+n_1} \pi_0^i = 1$ , 得到<sup>[4]</sup>

$$\pi_0^j = \left( \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_0^i}{\mu_0^i} \right) \pi_0^0, \quad 1 \leq j \leq n_1 + n_0 \quad (1)$$

其中

$$\pi_0^0 = \left[ 1 + \sum_{j=1}^{n_0+n_1} \left( \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_0^i}{\mu_0^i} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\mu_0^i = \begin{cases} i(\mu_0 + \eta_0), & 1 \leq i \leq n_0 \\ (i - n_0)(\mu_0 + \eta_{10}) + \mu_0^{n_0} / N, & n_0 \leq i \leq n_0 + n_1 \end{cases} \quad (3)$$

解出状态稳态概率后, 可以得到快用户呼叫阻塞率:

$$P_{0b} = \sum_{i=0}^{n_0+n_1-1} \pi_0^i (1 - P_{1pass}^{i+1}) + \pi_0^{n_0+n_1} \quad (4)$$

注意目前没有考虑切换呼叫的优先性, 有关内容将在下节讨论。

#### 3.2 慢用户业务的分析建模

与快用户业务分析模型相似, 双层蜂窝网的慢用户业务模型也是通过一个一维马尔可夫过程来描述, 见图 2。此模型中微小区部分的状态  $i$  表示在一个微小区内的慢用户数为  $i$ , 宏小区部分的状态  $i$  表示在一个微小区和覆盖它的宏小区的慢用户总数为  $i$ , 状态稳态概率表示为  $\pi_1^i$ 。

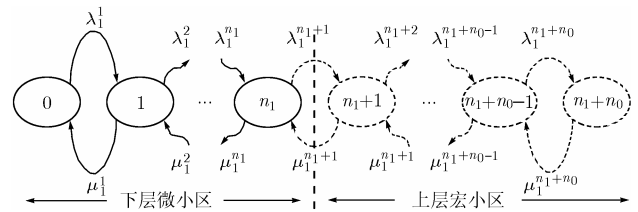


图 2 慢用户呼叫业务的一维马尔可夫状态模型

当所有慢用户呼叫都在微小区层没有发生溢出时, 慢用户呼叫到达率均值为  $\lambda_1^i = (\lambda_1^n + \lambda_1^h)P_{0pass}^i, 1 \leq i \leq n_1$ , 其中  $P_{0pass}^i$  表示系统中慢用户可以占用不小于  $i$  个信道的概率, 这意味着系统中的快用户占用的信道数不大于  $n_0 + n_1 - i$ , 它可以通过以下等式求出:

$$P_{0pass}^i = \sum_{j=0}^{n_0+n_1-i} \pi_0^j \quad (5)$$

同理

$$P_{0pass}^i = \sum_{j=0}^{n_0+n_1-i} \pi_1^j \quad (6)$$

当慢用户呼叫从微小区溢出, 一个宏小区覆盖下的所有微小区溢出到此宏小区的总业务仍为泊松流<sup>[7, 8]</sup>, 其到达率均值

为  $\lambda_0^i = ((\lambda_1^n + \lambda_{01}^n)N)P_{0pass}^i$ ,  $n_1 + 1 \leq i \leq n_1 + n_0$ 。

通过解马尔可夫状态方程和归一化条件  $\sum_{i=0}^{n_0+n_1} \pi_1^i = 1$ , 我们得到<sup>[4]</sup>

$$\pi_1^j = \left( \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_1^i}{\mu_1^i} \right) \pi_1^0, \quad 1 \leq j \leq n_1 + n_0 \quad (7)$$

其中

$$\pi_1^0 = \left[ 1 + \sum_{j=1}^{n_0+n_1} \left( \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_1^i}{\mu_1^i} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\mu_1^i = \begin{cases} i(\mu_1 + \eta_1), & 1 \leq i \leq n_1 \\ (i - n_1)(\mu_1 + \eta_{01}) + N\mu_1^{n_1}, & n_1 \leq i \leq n_1 + n_0 \end{cases} \quad (9)$$

随后可得到慢用户呼叫阻塞率为

$$P_{lb} = \sum_{i=0}^{n_0+n_1-1} \pi_1^i (1 - P_{0pass}^{i+1}) + \pi_1^{n_0+n_1} \quad (10)$$

### 3.3 迭代算法求解快用户和慢用户业务模型稳态概率

由于快用户和慢用户业务模型的状态相互依赖, 我们通过迭代来求得各自的状态稳态概率, 步骤如下:

- (1) 给快用户呼叫状态概率设定一组初值  $\pi_0^i, 0 \leq i \leq n_1 + n_0$ 。
- (2) 利用式(5)求出  $P_{0pass}^i$ 。
- (3) 利用等式(7)计算  $\pi_1^i, 0 \leq i \leq n_1 + n_0$ , 利用式(6)算  $P_{1pass}^i$ 。
- (4) 利用等式(1)解出  $\pi_0^{newi}$ 。
- (5) 如果对任意  $i (0 \leq i \leq n_0 + n_1)$ , 都有  $|\pi_0^i - \pi_0^{newi}| < \epsilon$ ,  $\epsilon$  是终止衡量标准, 则终止运算。否则, 设置  $\pi_0^i = \pi_0^{newi}$ , 回到步骤(2)。

通过以上迭代算法我们可得到快慢用户业务模型的稳态概率, 从而得到双层蜂窝网的阻塞概率为

$$P_b = P_{0b}P_0 + P_{1b}P_1 \quad (11)$$

其中  $P_0, P_1$  分别是快用户和慢用户的呼叫概率,  $P_{0b}, P_{1b}$  可以从式(4)和式(10)得出。

## 4 试验仿真和数据分析

为了比较用户分类模型的理论分析结果, 我们编写了一个离散事件驱动仿真程序。在仿真试验中, 为了简便, 使用圆形蜂窝。系统中共有 49 个微小区和 7 个宏小区。假设微小区半径为 300m, 宏小区半径为 900m。每个微小区有 8 个信道, 每个宏小区有 10 个信道。每个蜂窝小区在同一层有 6 个相邻蜂窝, 移动用户移动到这 6 个相邻小区的概率相同, 都是 1/6。为了消除仿真中系统初值设置的影响, 每次的仿真至少运行了  $10^6$  个新用户呼叫。

### 4.1 理论分析与仿真结果比较

一个重要的网络性能衡量参数就是新呼叫阻塞率  $P_b$ , 这里便比较通过理论分析和仿真试验得到的新呼叫阻塞率 ( $10\log P_b$ )。假设快慢用户呼叫的持续时间均值为  $\mu_0 = \mu_1 = 12 \text{ call/h}$ 。新呼叫和切换呼叫的逗留时间可通过所在小区

半径和移动速度计算<sup>[7]</sup>。假设移动用户在一个小区中不改变运动方向, 即成直线运动, 用户运动速度在 1 到  $V_{max} = 120\text{km/h}$  间均匀分布, 速度阈值  $V_{th} = 80\text{km/h}$ 。在图 3 中, 不仅显示了用户分类模型(User-classified)的分析结果, 还显示了层分类的泊松 (Poisson) 模型<sup>[4-6]</sup>和间断泊松模型<sup>[7,8]</sup>(IPP)的分析结果。通过图形比较容易看出本文提出的用户分类模型较其他两种方法更贴近仿真结果, 提供了更高的准确性。这是因为用户分类模型将上下层蜂窝结合建模, 考虑了宏小区和微小区的相关性。

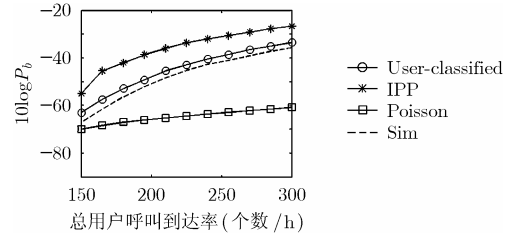


图3 建模与仿真的性能分析结果比较

从整体上看, 用户分类模型得到的分析数值略高于仿真试验。这是由于在确定模型中宏小区和微小区部分的到达率参数时, 我们认为所用被同一宏小区覆盖的微小区的溢出业务量模型完全一样, 即它们同时发生溢出, 这样的假设导致业务量的突发性比实际情况要高, 因而阻塞率略高。另外, 我们看到 Poisson 模型比 IPP 模型的偏差更大, 这是由于 Poisson 模型忽略了业务流的突发性。

### 4.2 速度阈值作用

通过调整速度阈值可以改变微小区和宏小区层接入的业务量分配。图 4 和图 5 分别显示了阈值为  $V_{th} = 20\text{km/h}$  和  $V_{th} = 100\text{km/h}$  时的新呼叫阻塞率  $P_b$  和切换呼叫中断率  $P_d$ , 可以看出随着总业务量的增大  $P_b$  和  $P_d$  都逐渐增大。当呼叫到达率较小(轻负载)时,  $V_{th} = 100\text{km/h}$  条件下的  $P_b$  和  $P_d$  较小, 而在呼叫到达率较大(重负载)时,  $V_{th} = 20\text{km/h}$  条件下的  $P_b$  和  $P_d$  较小。这是由于在轻负载时, 大的速度阈值使得更多的用户接入到下层微小区, 这样上层宏小区有更多的信道用来业务平衡, 可以达到较高的系统容量; 而在重负载情况下, 较小的速度阈值使得更多的用户接入上层宏小区, 减少了切换率。

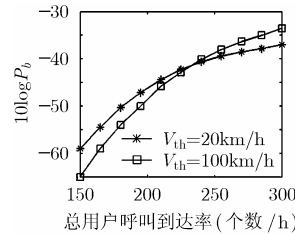


图4 不同速度阈值 ( $V_{th}$ ) 下的新呼叫阻塞率比较

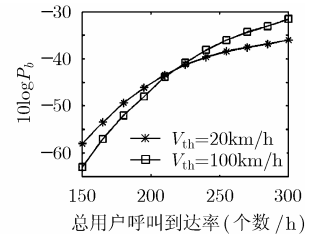


图5 不同速度阈值 ( $V_{th}$ ) 下的切换呼叫中断率比较

### 4.3 被阻用户重复呼叫的性能分析

之前的分析都是在假设呼叫到达率规则的情况下进行的, 而实际上, 没有被接入的新呼叫用户通常将重复呼叫,

即被阻用户重复呼叫。此情况将增加另一个呼叫源,即重复呼叫源,也就是将模型中的快用户和慢用户的新呼叫到达率分别增大  $P_{0b}E(r)$  和  $P_{1b}E(r)$  倍,其中  $P_{0b}, P_{1b}$  分别是快用户和慢用户的新呼叫阻塞率,  $E(r)$  是被阻新呼叫重复呼叫的平均次数。图6分别显示了重复呼叫次数为5和没有重复呼叫的情况的新呼叫阻塞率。可以看出,由于重复呼叫增大了呼叫到达率,使得新呼叫阻塞率略微提高。

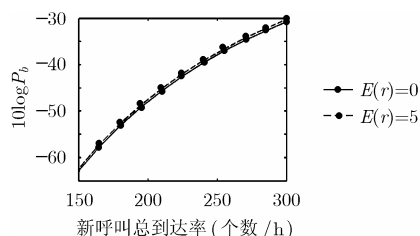


图6 被阻用户有无重复呼叫的新呼叫阻塞率比较

## 5 结束语

通过以上分析可知,用户分类的建模方法既简单又能够准确地估计双层蜂窝网结构的网络性能。另外,为切换呼叫提供适当大小的缓存可以大大降低切换呼叫被迫中止率,同时对新呼叫阻塞率没有大的影响;更符合实际情况的被阻用户重复呼叫的新呼叫阻塞率略微提高。

下一代无线网络需要支持多种业务,而不同种类的业务对网络要求也不同。因此对多业务分层蜂窝网的性能分析,并为不同业务用户合理选择接入层是一个值得研究的课题。

## 参考文献

- [1] Wu Xiaoxin, Mukherjee Biswanath, and Ghosal Dipak. Hierarchical architectures in the third-generation cellular network. *IEEE Wireless Communications*, 2004, 11(3): 62-71.
- [2] Anpalagan A S and Irene K. Overlaid cellular system design with cell selection criteria for mobile wireless users. *IEEE*

- Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 1999, 1: 24-28.
- [3] Han Seung-Jae and Klein E. Performance analysis of online and adaptive assignment strategies for wireless data users in hierarchical overlay networks. *GLOBECOM 2003-IEEE Global Telecommunications Conference*, Dec 2003, 1: 507-512.
- [4] Liu X and Fapojuwo A O. Resource management for handoff traffic in hierarchical cellular networks. *24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, 7-9 April, 2005: 615-620.
- [5] Nabil M and Zahra M M. Dynamic channels reallocation management scheme in hierarchical cellular network. *ICEEC '04*, 5-7 Sept., 2004: 614-618.
- [6] Shan Wenhao, Fan Pingzhi, and Pan Yi. Performance evaluation of a hierarchical cellular system with mobile velocity-based bidirectional call-overflow scheme. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2003, 14(1): 72-83.
- [7] Zhou Yong and Jabbari B. Performance modeling and analysis of hierarchical wireless communications networks with overflow and take-back traffic. *The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept. 1998, 3: 1176-1180.
- [8] Chung Shun-Ping and Lee Jin-Chang. Performance analysis and overflowed traffic characterization in multiservice hierarchical wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 904-918.

- 刘莉: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为IP多媒体技术、视频信息处理及其网络应用等。
- 荆涛: 男, 1964年生, 博士, 副教授, 研究方向为多媒体通信、通信与信息系统。
- 付立: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为多媒体通信。