

多层蜂窝系统双向溢出呼叫模型及分析¹

蒋体钢 范平志

(西南交通大学移动通信研究所 成都 610031)

摘要: 该文给出了 N 层蜂窝覆盖系统双向呼叫溢出信道指配策略的一般模型及分析方法, 并给出了一个 4 层模型分析结果. 通过设定不同参数, 该文方法可用于分析任意多层蜂窝系统双向溢出、单向上溢出、单向下溢出、部分双向溢出和部分单向溢出等呼叫溢出策略.

关键词: 多层蜂窝系统, 切换, 信道分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1358-06

Bidirectional Call-Overflow Model and Analysis for Hierarchical Cellular Systems

Jiang Ti-gang Fan Ping-zhi

(Institute of Mobile Communications, Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China)

Abstract This paper proposes a general model and approach to analyze the bidirectional call-overflow scheme for an arbitrary Hierarchical Cellular System (HCS) with N layers, as illustrated by a 4-layer HCS. By setting different parameters, the proposed approach can be used to analyze various overflow schemes in any HCS with multiple layers, such as unidirectional or bidirectional overflows or partial overflows.

Key words Hierarchical cellular system, Handoff, Channel allocation

1 引言

随着移动通信业务量的迅猛增加, 多层蜂窝覆盖系统逐渐成为当前研究的一个热点. 在多层蜂窝覆盖系统中, 大半径蜂窝可以为较高速用户提供服务, 小半径蜂窝可以为较低速用户服务. 蜂窝分层不仅可以提高信道复用率, 而且可以减少切换, 达到提高系统容量和服务质量以及降低系统负载等目的.

当前, 对多层蜂窝系统的信道指配策略研究主要集中在宏、微二层蜂窝覆盖上. 当呼叫发生时, 根据其移动速度 (假设移动速度测定比较准确) 和一定的速度门限, 将呼叫分为慢速呼叫和快速呼叫, 分别由微蜂窝和宏蜂窝接纳服务^[1,2]. 在较早研究的文献中, 一定速度的呼叫只能在相应服务的蜂窝层中服务, 而不能溢出到其它蜂窝层中^[3,4], 因而可能导致一些呼叫由于相应服务的蜂窝小区没有空闲信道, 却不能占用其它蜂窝层小区具有的空闲信道的情况, 从而浪费频率资源和降低服务质量.

在文献 [5] 中, Rappaport 和 Hu 给出了宏、微二层蜂窝系统单向溢出策略, 此文将微蜂窝为慢速新呼叫和慢速切换呼叫服务, 而宏蜂窝不仅为相应的快速新呼叫和快速切换呼叫服务, 而且作为微蜂窝的呼叫溢出池, 并在各层中为切换呼叫预留优先信道. 后来, Rappaport 用相似的方法对三层蜂窝系统进行了研究和分析^[6]. Sung^[7] 将模糊逻辑应用于宏、微二层蜂窝系统呼叫层选, 通过仿真得出了比固定门限层选更好的服务性能, 这种方法的优点是呼叫随时可以根据当前信道占用情况重新分配到不同的层中. Wie^[8] 给出了宏、微二层系统的双向溢出策略, 重点对切换溢出进行了分析, 并分析了不同速度呼叫的性能, 但是此方案的一个缺点是高

¹ 2003-04-29 收到, 2003-10-30 改回

国家自然科学基金资助项目 (60218001, 60272070)

层向低层的溢出导致低速呼叫的阻塞率大大增加。Shan^[9] 比较全面地分析了宏、微二层蜂窝系统下的双向溢出呼叫策略及系统性能，得出了双向溢出呼叫总体优于单向溢出呼叫的结论，但此文主要目的是比较双向溢出和单向溢出的性能差别，没有就双向溢出策略本身在多层环境及不同呼叫率下的性能进行分析。

随着移动通信覆盖质量和容量要求的提高，3 层和 3 层以上蜂窝网络逐步成为可能，如由卫星通信层、对流通信层（热气球通信平台）、宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝等组成的多层蜂窝网络。因而，本文基于双向溢出策略具有比单向溢出策略更好的综合性能^[8,9]，给出了任意 N 层蜂窝系统双向呼叫溢出策略的一般模型和分析方法，并对系统性能进行了分析。本文后面各节内容安排如下，第 2 节介绍基本系统模型和相关假设，第 3 节介绍层间双向呼叫溢出策略，第 4 节进行数值分析，最后在第 5 节总结全文。

2 基本系统模型和相关假设

本文多层蜂窝系统采用标准正六边形完全覆盖，各层蜂窝小区频率复用因子均为 $1/K$ ，第 I 层蜂窝完全覆盖第 $I - 1$ 层的 K 个蜂窝，每一蜂窝簇的 K 个小区可用信道数量相同但互不干扰。同时，各层也使用频率互不干扰的信道资源。图 1 给出了一个 4 层蜂窝系统模型的示意图。本模型中的相关假设如下：

- (1) 已知比较准确的速度预测信息；
- (2) 各层内新呼叫和切换呼叫到达率均服从泊松分布，服务时间均服从指数分布；
- (3) 各层采用切换呼叫优先策略，为切换呼叫保留一定的信道；
- (4) 各层均采用固定信道分配 (FCA) 策略方案。

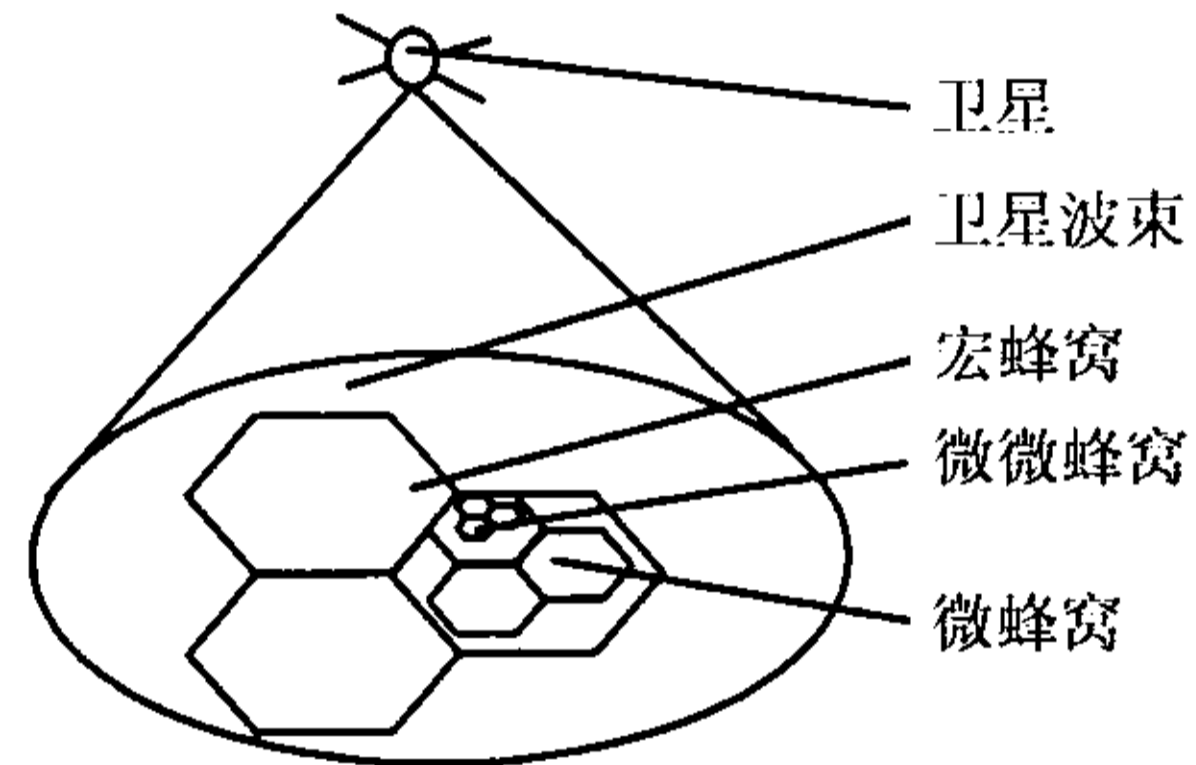


图 1 4 层蜂窝系统示意图

3 层间双向呼叫溢出策略

假设一个第 I 层的蜂窝信道总数为 C_i ，为切换呼叫保留信道 $C_{i,g}$ 。如果一个 (溢出) 新呼叫到达第 I 层蜂窝时，若此蜂窝空闲信道数小于 $C_{i,g}$ ，则新呼叫将根据一定的概率溢出到第 $(I + 1)$ 层或第 $(I - 1)$ 层蜂窝小区，而溢出新呼叫被阻塞。当 (溢出) 切换呼叫到达时，

如果相应蜂窝层小区没有空闲信道，则切换呼叫也将根据一定的概率溢出到第 $(I + 1)$ 层或第 $(I - 1)$ 层蜂窝小区，而溢出切换呼叫被阻塞。层间双向溢出模型如图 2 所示。

本文假设第 I 层蜂窝的呼叫只能以一定概率溢出到第 $(I + 1)$ 层或第 $(I - 1)$ 层 (这将取决于各层规定的接收呼叫移动速度范围和层间门限)，通过设定不同的概率溢出值，本文给出的方法可以推广到任意 N 层蜂窝系统双向溢出，单向上溢出，单向下溢出，部分双向溢出，部分单向溢出等呼叫溢出策略。本文还设定：由于非相邻层速度门

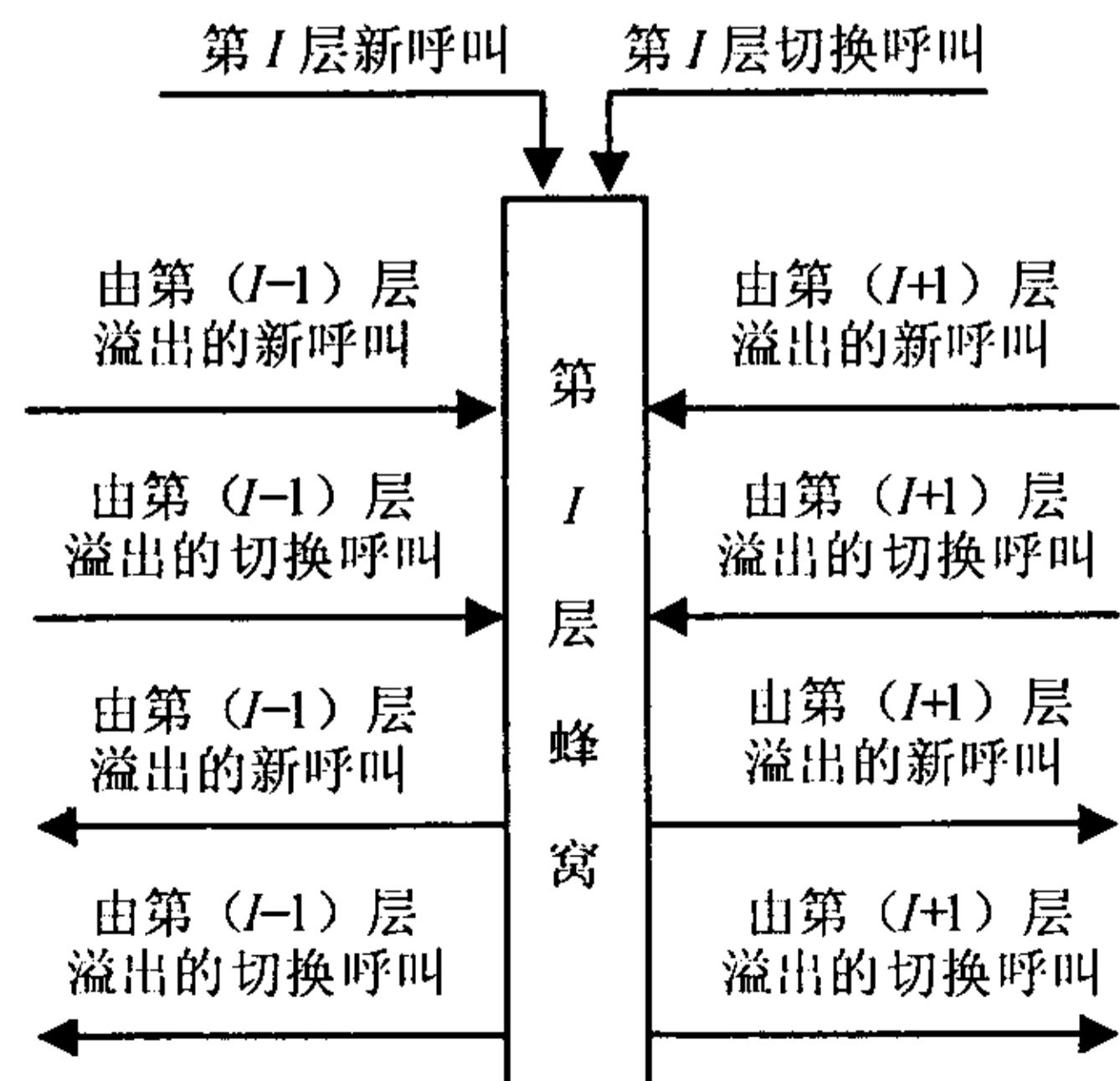


图 2 第 I 层蜂窝双向呼叫溢出策略

限差别太大的原因, 根据呼叫移动速度本应由第 I 层服务的呼叫只有可能被第 I 层, 第 $(I - 1)$ 层和第 $(I + 1)$ 层服务, 如果被这三层以外的层服务, 可能将引起系统性能变坏, 例如, 第 $(I - 1)$ 层溢出到第 I 层的呼叫不能再次溢出到第 $(I + 1)$ 层。

第 I 层的信道状态转移实际上是一个一维 Markov 模型, 如图 3 所示。

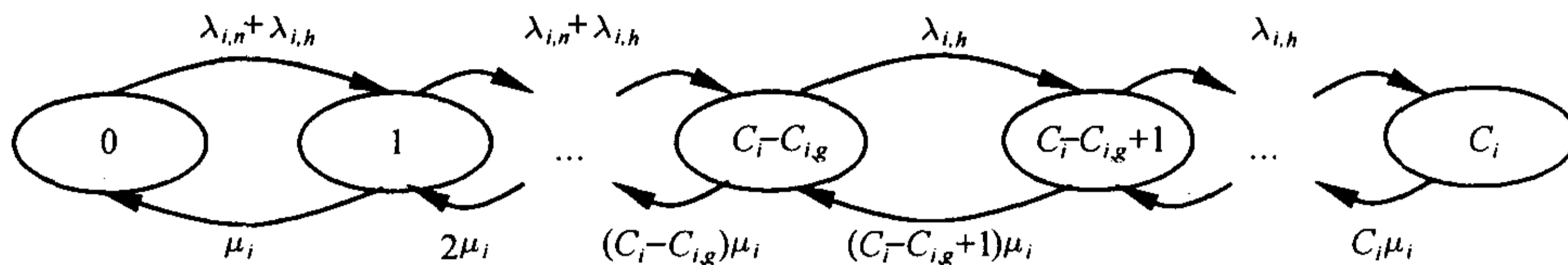


图 3 第 I 层蜂窝信道状态转移图

对一个 N 层蜂窝系统的第 I 层蜂窝, 有以下参数。

$\lambda'_{i,n}$ 和 $\lambda'_{i,h}$: 根据一定速度门限应该分配到第 I 层蜂窝的新呼叫到达率和切换呼叫到达率; $\lambda_{i,n}$ 和 $\lambda_{i,h}$ 分别表示第 I 层实际的新呼叫和切换呼叫到达率 (包括第 I 层自己的到达率和其他层溢出的到达率); $P_{i,b}$ 和 $P_{i,h}$: 第 I 层的新呼叫阻塞率和切换呼叫失败率; $(0/0)_{i,n,d}$ 和 $(0/0)_{i,h,d}$: 表示第 I 层的溢出新呼叫和切换呼叫向第 $(I - 1)$ 层溢出的概率; $(0/0)_{i,n,u}$ 和 $(0/0)_{i,h,u}$: 表示第 I 层的溢出新呼叫和切换呼叫向第 $(I + 1)$ 层溢出的概率, $1/u_i$ 为第 I 层对其所服务呼叫的平均服务时间。

由上文所描述的双向呼叫溢出方案, 第 I 层新呼叫和切换呼叫的到达率为

$$\lambda_{i,n} = \lambda'_{i,n} + KP_{i-1,b}\lambda'_{i-1,n}(0/0)_{i-1,n,u} + P_{i+1,b}\lambda'_{i+1,n}(0/0)_{i+1,n,d}/K \tag{1}$$

$$\lambda_{i,h} = \lambda'_{i,h} + KP_{i-1,h}\lambda'_{i-1,h}(0/0)_{i-1,h,u} + P_{i+1,hf}\lambda'_{i+1,h}(0/0)_{i+1,h,d}/K \tag{2}$$

其中, 由于第 0 层和第 $(N + 1)$ 层并不存在, 所以有

$$\begin{aligned} P_{0,b} = P_{0,hf} = P_{N+1,b} = P_{N+1,hf} = 0; \quad (0/0)_{i,n,u} = (0/0)_{1,h,u} = (0/0)_{N,n,d} = (0/0)_{N,h,d} = 1 \\ (0/0)_{0,n,u} = (0/0)_{0,h,u} = (0/0)_{1,n,d} = (0/0)_{1,h,d} \\ = (0/0)_{N,n,u} = (0/0)_{N,h,u} = (0/0)_{N+1,n,d} = (0/0)_{N+1,h,d} = 0 \end{aligned}$$

根据上述分析与参数说明, 第 I 层蜂窝可以定为 $M/M/C_i/C_i$ 的 Erlang 损失系统^[10], 当第 I 层蜂窝信道占用数为 j 时的概率为

$$P_j^{(i)} = \begin{cases} \frac{(\lambda_{i,n} + \lambda_{i,h})^j}{j!u_i^j} P_0^{(i)}, & 0 \leq j \leq C_i - C_{i,g} \\ \frac{(\lambda_{i,n} + \lambda_{i,h})^{C_i - C_{i,g}} \lambda_{i,h}^{j - C_i + C_{i,g}}}{j!u_i^j} P_0^{(i)}, & C_i - C_{i,g} \leq j \leq C_i \end{cases} \tag{3}$$

根据排队论理论, 可以得到式 (4)~(6):

$$\sum_{j=0}^{C_i} P_j^{(i)} = 1 \tag{4}$$

$$P_{i,b} = \sum_{j=C_i - C_{i,g}}^{C_i} P_j^{(i)} \tag{5}$$

$$P_{i,hf} = P_{C_i} \tag{6}$$

由式 (1)~ 式 (6) 可见, 求 $\lambda_{i,n}, \lambda_{i,h}, P_{i,b}, P_{i,hf}$ 的解是解一个有 $4N$ 个未知数, 由 $4N$ 个非线性方程构成的非线性方程组的问题, 结果很难得出解析表达式, 但是可以用牛顿法进行数值模拟求解 (见附录)。

4 数值分析

4.1 参数假设

(1) 以 4 层蜂窝系统为例 ($N = 4$), 小区复用因子 $1/K = 1/7$;

(2) 假设处于中间层的蜂窝层新呼叫和溢出呼叫都以等概率向上一层或下一层溢出, 即 $(0/0)_{i,n,d} = (0/0)_{i,h,d} = (0/0)_{i,n,u} = (0/0)_{i,h,u} = 1/2, (i = 2, \dots, N - 1)$;

(3) 各层信道配置与呼叫服务率参数设置:

假设用户根据速度由低到高分为 4 个组, 分别占总呼叫的 50%, 35%, 14% 和 1%, 并且分别由第 1, 2, 3, 4 层首先接纳, 则各层呼叫到达率之比为 $1 : \frac{35}{50} \times 7 : \frac{14}{50} \times 7^2 : \frac{1}{50} \times 7^3$, 各层呼叫 Erlang 之比为 $\frac{1}{\mu_1} : \frac{35}{50\mu_2} \times 7 : \frac{14}{50\mu_3} \times 7^2 : \frac{1}{50\mu_4} \times 7^3$, 各层蜂窝小区信道配置之比可以参照各层呼叫 Erlang 之比进行设定, 由于计算机在求大整数阶乘方面的局限性, 本文设置第 1 层只有 3 个信道, 但这不会影响分析结果趋势的正确性。设由第 1 层发起的新呼叫 Erlang 在 (10, 100) 之间变化, 具体参数表见表 1:

表 1 蜂窝系统性能分析参数及其值

参数名	$1/\mu_1$	$1/\mu_2$	$1/\mu_3$	$1/\mu_4$	C_1	C_2	C_3	C_4	$C_{i,g}$	$\lambda'_{i,h}$
参数值	60s	120s	240s	480s	3	30	165	165	$0.2C_i$	$0.4\lambda'_{i,n}$

4.2 数值结果与分析

由图 4~ 图 6 可见 (图 4~ 图 9 的横坐标意义: 最底层蜂窝小区在单位时间内的新呼叫到达 Erlang, 各层所占新呼叫率分别为整个系统新呼叫率的百分比如前文所述, 且各层切换呼叫到达率为其新呼叫到达率的 20%), 随着整个系统整体新呼叫率的增大, 各层蜂窝新呼叫阻塞率和切换呼叫失败率随着增大, 但较高蜂窝层新呼叫阻塞率和切换呼叫失败率增加速度比较低层蜂窝的快的多, 这与呼叫率的增大导致数量较多的低层新呼叫向较高层溢出有关, 因为较高层蜂窝主要用于服务较高速用户, 由较低层蜂窝溢出的较慢速新呼叫占用了本应由较高速呼叫占用的信道。

各层新呼叫阻塞率和切换失败率在比较高的新呼叫到达 Erlang 下增加显著缓慢; 这都与呼叫双向溢出机制有关。说明双向溢出的确有很好的负荷均衡性。

显然, 由于高低速呼叫分别集中在高低蜂窝层, 在双向溢出呼叫策略下, 即使某一层呼叫以等概率向两个相邻层溢出, 由于高低速用户在不同层集中程度和其在各自层中分布密度不同的原因, 在整体新呼叫率增加时, 较低蜂窝层新呼叫和切换呼叫将得到实惠, 而较高蜂窝层新呼叫和切换呼叫受到损失; 同时, 从图 4, 图 5, 图 6 可以看出: 切换优先的预留信道扮演非常重要的角色, 它使同一环境下的切换失败概率比新呼叫阻塞率小的多。

图 7, 图 8, 图 9 表示根据一定速度应该由其相应蜂窝层服务的用户 (不包括其它层溢出到本层的呼叫) 新呼叫阻塞率和切换失败率的变化情况, 可见, 处于中间的第 3 层新呼叫阻塞率和切换失败率均较小, 同样, 对第 2 层而言, 如果考虑到其呼叫量占总体呼叫量的 35%, 其新呼叫阻塞率和切换失败率也是相对较小的。这是因为它们都可以向两个相邻层溢出的原因。这反映出 2 层以上蜂窝系统中间层服务质量较好, 应该在多层蜂窝信道指配策略中重点考虑。

从第 1、第 2、第 3 层和第 4 层的总体性能来看, 如果考虑它们各自占有的信道数, 处于中间层的第 2, 3 层相对负荷要大于最底层的第 1 层和最高层的第 4 层, 这是因为第 1 层和最高层的第 4 层只能分别向第 2 层和第 3 层溢出的原因。可见, 中间层在多层蜂窝系统中的角色非常重要。这是因为实际中处于相对极高速和相对极低速的用户较少, 大部分用户处于较低速和

较高速之间。在实际操作中应该给中间层相对更多的信道，可以避免由于中间层信道太少而向最底层和最高层溢出，导致浪费信道资源和增加交换机负荷。

确定各层间最优信道配置和各层速度门限是多层蜂窝系统的一个重要研究内容，由于本文主要旨在阐明任意 N 层蜂窝系统双向溢出呼叫的一般模型和分析方法，各层信道数量配置参照各层新呼叫到达 Erlang 百分比来划分，所得的分析都是在一定参数值下得到的。必须指出，各层单位面积信道数、单位面积呼叫到达率和高层蜂窝扮演的机制（主要扮演溢出池或主要为高速用户服务）都是影响各层性能的重要原因。这将在未来的研究中继续深入探讨。

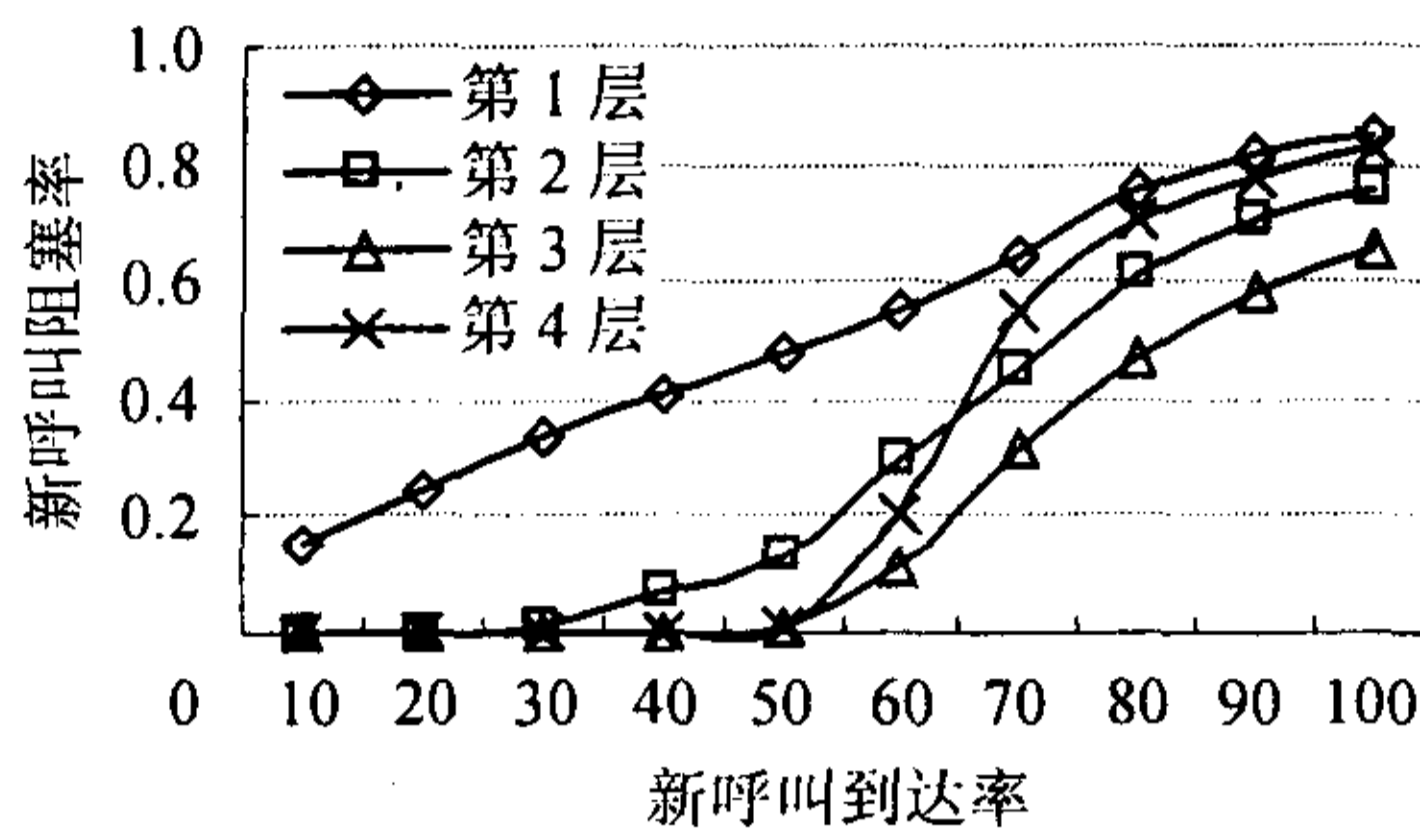


图4 新呼叫阻塞率变化

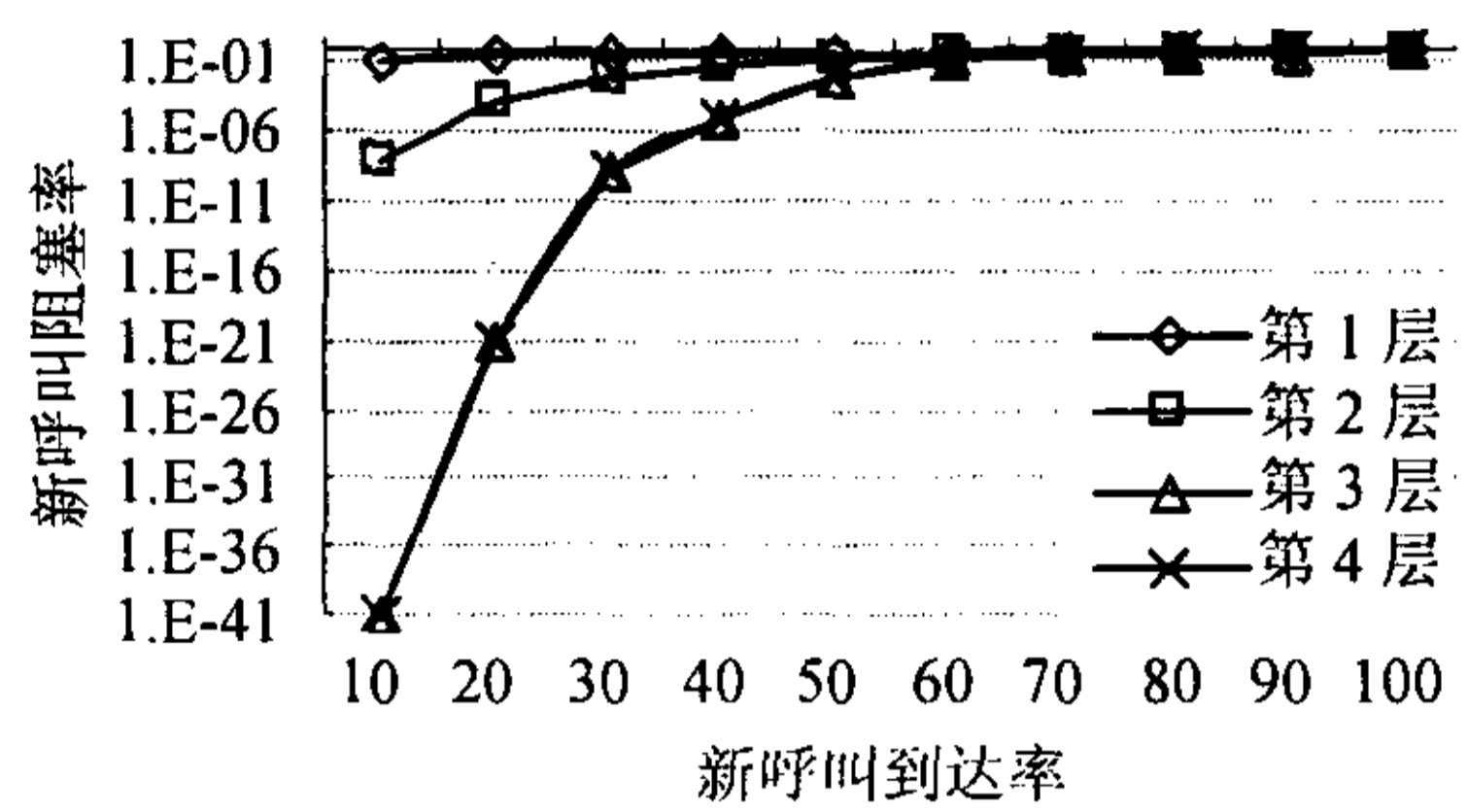


图5 新呼叫阻塞率变化

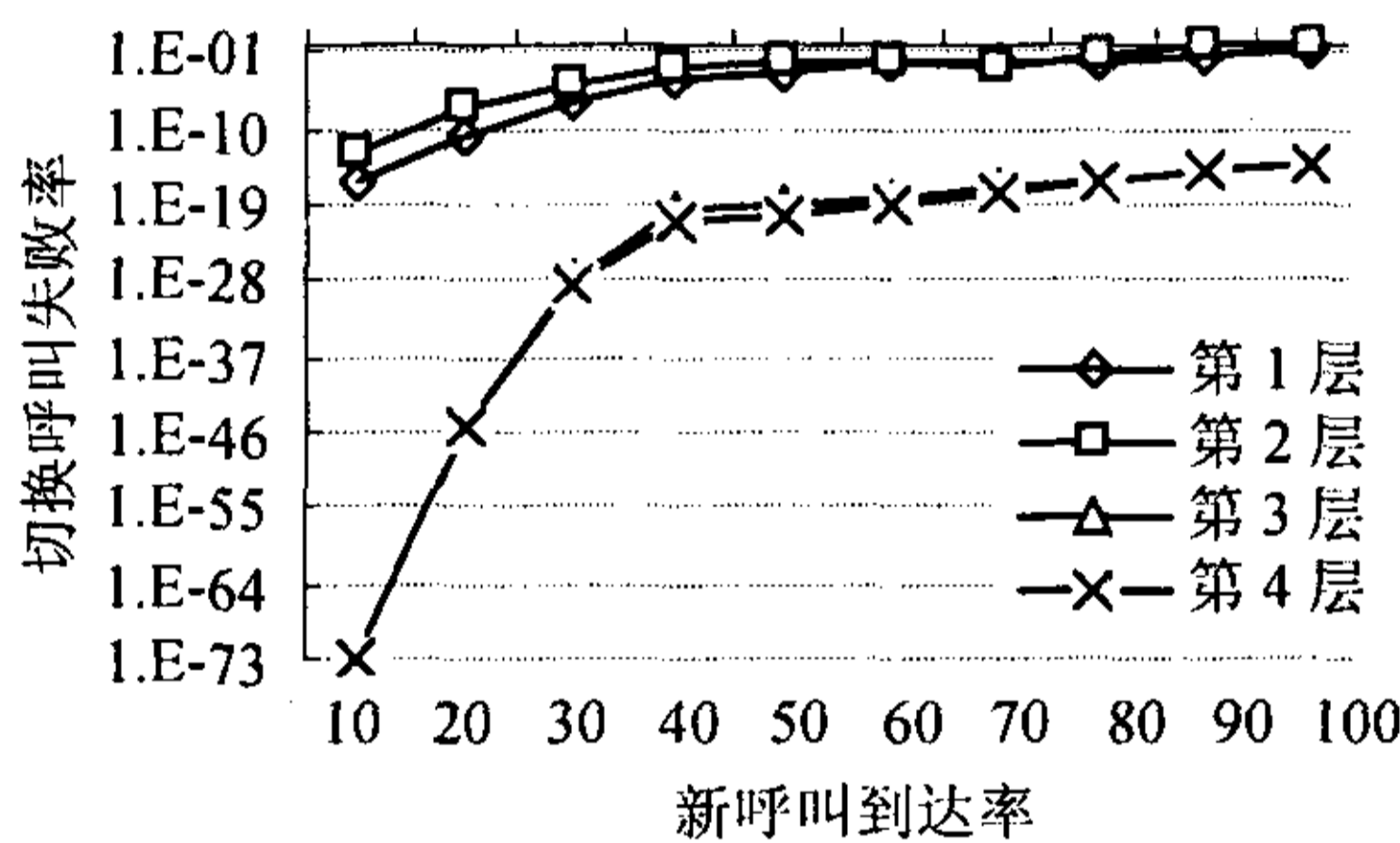


图6 切换呼叫失败率变化

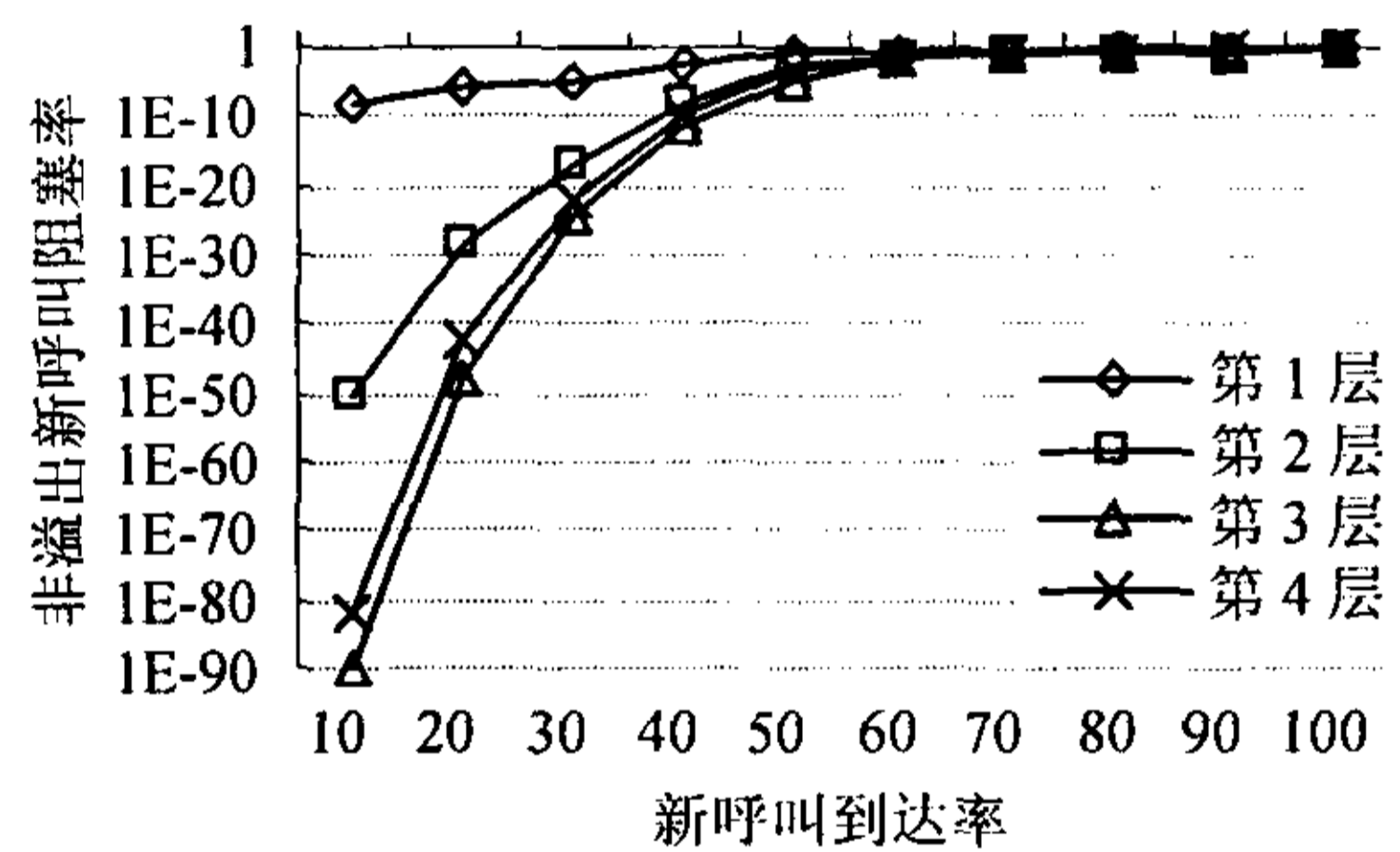


图7 非溢出新呼叫阻塞率变化

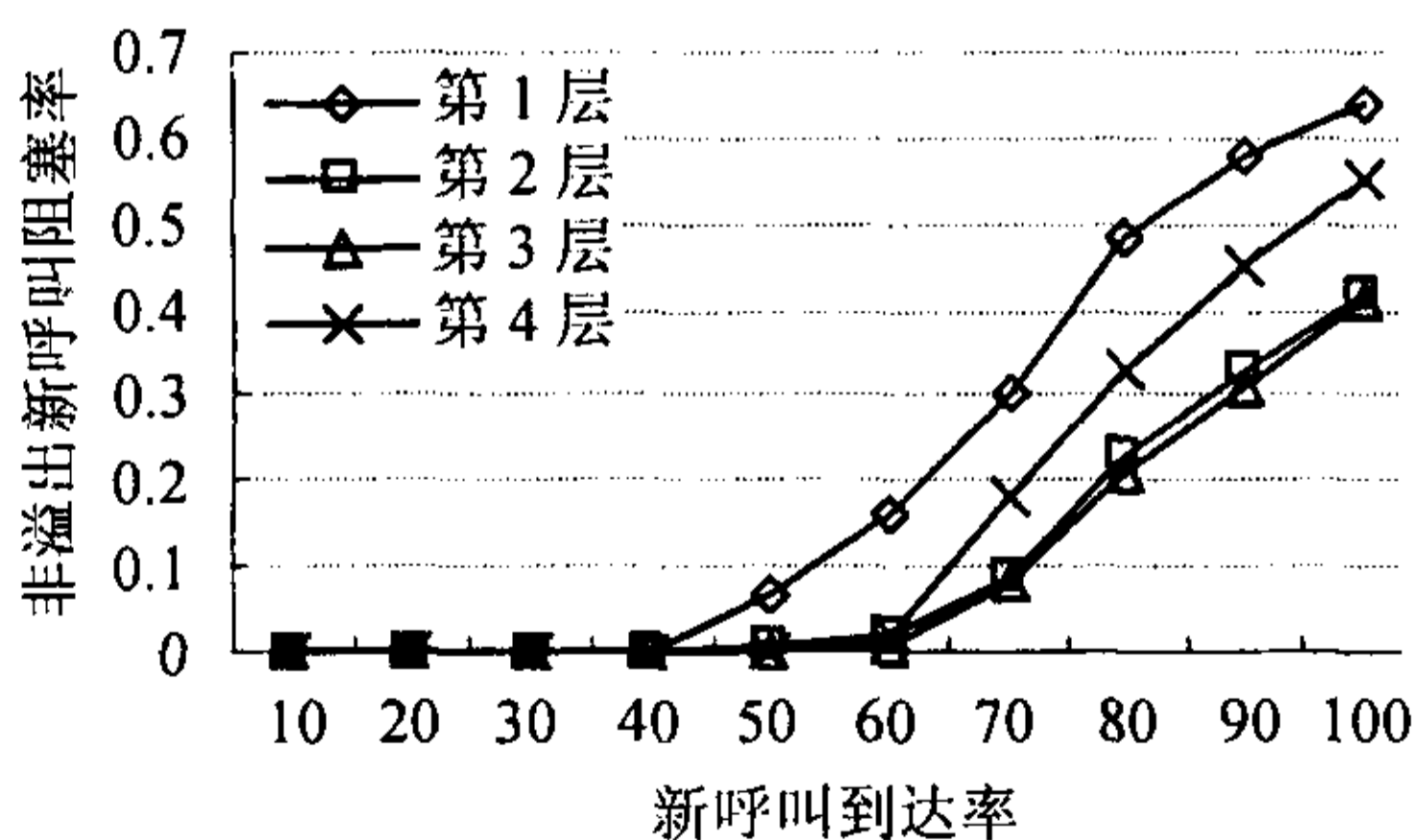


图8 非溢出新呼叫阻塞率变化

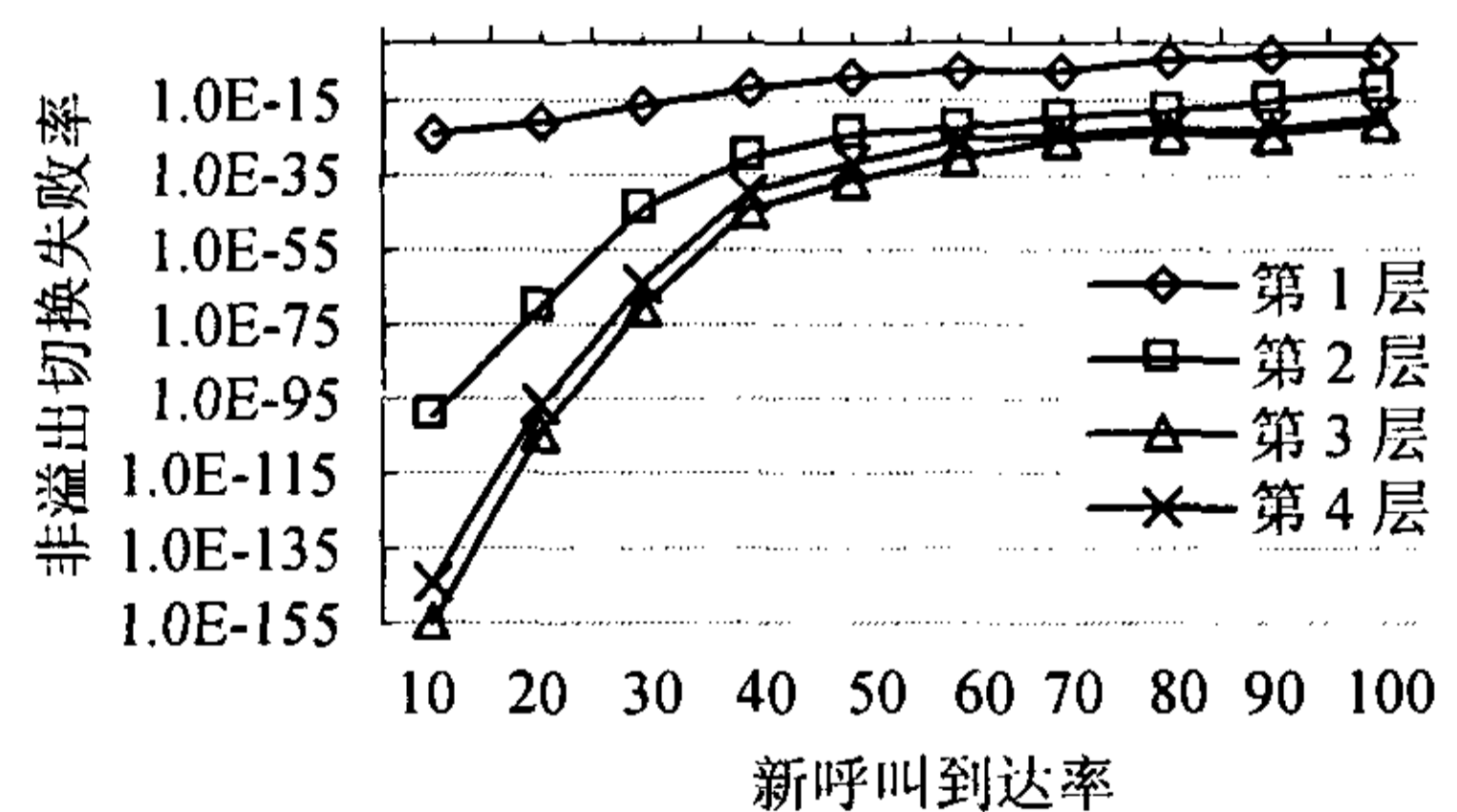


图9 非溢出切换失败率变化

5 结论

本文通过对任意 N 层蜂窝系统的分析研究，得出了任意 N 层蜂窝系统双向溢出呼叫策略的一般分析方法。通过分析各层在不同呼叫到达率下的服务性能及其产生原因，本文给出了多层蜂窝系统信道指派策略的一些建议。针对不同实际系统，通过设定不同参数值，本文给出的

方法可以推广到任意 N 层蜂窝系统双向溢出, 单向上溢出, 单向下溢出, 部分双向溢出, 部分单向溢出等呼叫溢出策略。

附录

根据牛顿迭代法解非线性方程组, 已知非线性方程组:

$$F[x] = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots) \\ f_2(x_1, x_2, \dots) \\ f_3(x_1, x_2, \dots) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots) \end{bmatrix} = 0$$

由牛顿迭代法:

$$X^{k+1} = X^k - (F'[X])^{-1}F[X] \quad (7)$$

首先解出 $F'[X]$ 的表达式 (由本文式 (1)~式 (6) 所确定的 $F'[X]$ 不难得出); 任意选定 $X^1 = (x_1, x_2, \dots)$; 将 X^0 代入 $F'[X]$ 和 $F[X]$, 由迭代式 (7), 得出 X^1 , 再将 X^1 代入式 (7), 得到 X^2 , 由此循环, 直到 $\|X^k - X^{k+1}\| < \varepsilon$. 本文设 $\varepsilon = 10^{-20}$.

参 考 文 献

- [1] Rappaport T S. *Wireless Communications Principles and Practice*. New York, Prentice Hall, 1996.
- [2] Kolavennu V R, Rappaport S S. Traffic performance characterization of a personal radio communication system. *IEE Proc. Comm.*, 1986, 133(3): 550-561.
- [3] Chin-Lin I, Greenstein L J, Gitlin R D. A microcell/macrocell cellular architecture for low and high-mobility wireless user. *IEEE J. on Selected Areas Comm.*, 1993, 11(6): 885-891.
- [4] Murata M, Nakano E. Enhancing the performance of mobile communications system. Proc. IEEE Int'l Conf. Universal Personal Comm. (ICUPC'93), Ottawa, ON, Canada, 1993: 732-736.
- [5] Rappaport S S, Hu L R. Microcellular communication systems with reneging and dropping for waiting new and handoff calls. *Proc. IEEE*, 1994, 82(9): 1383-1397.
- [6] Rappaport S S, Hu L R. Personal communication systems using multiple hierarchical cellular overlays. *IEEE J. on Selected Areas Comm.*, 1995, 13(2): 406-415.
- [7] Sung C W, Wong W S. User speed estimation and dynamic channel allocation in hierarchical cellular system. Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'94), Stockholm, Sweden, 1994: 91-95.
- [8] Wie S H, Jang J S, Shin B C, *et al.* Handoff analysis of the hierarchical cellular system. *IEEE Trans. on VT*, 2000, 49(5): 2027-2036.
- [9] Shan Wenhao, Fan Pingzhi, 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.
- [10] Cooper R B. *Introduction to Queuing Theory*. New York: Edward Arnold, 1981, Chapter 5.

蒋体钢: 男, 1976年生, 博士生, 主要研究方向: 小区切换、信道分配、多层蜂窝网络。

范平志: 男, 工学博士(英国), IEEE高级会员, 教授、博士生导师, 英国Leeds大学客座教授, 主要研究兴趣为码分多址通信、序列设计与编码、多用户编码、信息安全等领域。