

# 复杂用户网络在移动通信方面的应用研究\*

谭伟文<sup>†</sup> 刘重明 谢智刚

香港理工大学, 香港

**摘要** 在传统的移动蜂窝系统研究中, 所有用户都假设具有相同的行为, 即他们以相等的概率打出/接听电话, 以及他们以相同的移动性在网络内移动. 还有, 基础用户网络假设为一个全互联的网络, 这暗示着所有的用户都互相认识, 且以同一概率进行相互通讯. 但在现实的环境中, 每个用户有各自的熟人 (包括家人、亲戚、朋友和同事) 通讯录, 其通讯录的大小也视乎个别用户而有所不同. 此外, 由于用户的移动性取决于各种各样的因素 (如工作性质等), 不同用户的移动程度也不尽相同. 为了估计移动系统更接近实际的性能, 我们使用无尺度网络作为潜在的用户网络模型, 即一个用户的熟人数目服从幂律分布, 并且研究在 3 种移动性 (即零移动性、相同移动性和幂律移动性) 下的移动系统. 最后, 通过计算机仿真来估计系统的性能指标 (如承载话务量和阻塞率等). 结果表明, 用户网络结构以及用户移动性都会对移动系统的性能产生影响.

**关键词** 复杂网络, 全互联网络, 无尺度网络, 移动蜂窝系统, 阻塞率, 移动性

## 1 引言

因网络无处不在, 其例子包括食物网、电源系统、互联网和人际网, 所以复杂网络的研究吸引了人们越来越浓厚的兴趣. 虽然其中一种复杂网络模型即随机图<sup>[1,2]</sup>已经经过多年的研究, 然而其他的复杂网络模型, 包括小世界网络、无尺度网络和广义随机图等模型, 直到最近才引起人们的关注<sup>[3~8]</sup>.

在通信方面, 复杂网络被广泛应用于互联网、编码以及电信系统的用户网等方面的研究中. 对于互联网, 可以从两个不同的层面进行研究, 即自治系统 (autonomous system, AS) 层面和路由器层面. 在自治系统层面上, 节点代表 AS. 而在路由器层面上, 节点代表路由器, 节点之间的连线则相应代表 AS 或路由器之间的物理连线. 复杂网络在互联网中的研究主要包括: 网络的建模<sup>[9~13]</sup>以及网络的动态<sup>[14~18]</sup>. 自从 1999 年 Faloutsos 等<sup>[19]</sup>发现互联网是一个无尺度网络后, 人们对互联网的拓扑结构及其建模进行了更深入的研究. 根据节点度的

分布, Barabasi 和 Albert<sup>[9]</sup>提出了一种无尺度模型, 并在此基础上构建了一种通用的模型<sup>[10]</sup>. 考虑到互联网中节点的增长性及其分布, Yook 等<sup>[11]</sup>同时在两种层面上提出了网络的另一种模型. 而 Zhou 等<sup>[12]</sup>在 AS 层面上构造出一个更准确的模型, 使网络在以下方面具有互联网的特征: 度分布、富人俱乐部特性、最短路径长度、异配性以及介数等. 另外, 在路由器层面上, 路由器倾向连接属于同一 AS 的路由器. 根据这一特点, Chen 等<sup>[13]</sup>引入了一种多局域世界模型. 在网络动态方面, 路由的设计是其中一个很重要的研究课题. 有效的路由策略可增大吞吐量及减少传送时间. 通常, 路由策略分为两种, 即全局路由策略和局部路由策略. 对于全局路由策略, 每一个路由器需要掌握所有路由器的信息, 例如最短路径策略<sup>[14,15]</sup>需要估计出两个路由器间的最短路径. 理论上, 如果节点的传送能力没有限制的话, 这种策略传送数据包的速度最快. 但是在无尺度网络中, 度数大的节点会有较多的数据包需要传送, 而且由于节点的传送能力有限, 传送速度就会减慢, 甚至会引起阻塞. 在全局路由策略

收稿日期: 2008-06-30, 修回日期: 2008-08-21

\* 香港理工大学研究基金 (G-YF51) 资助项目

<sup>†</sup> E-mail: tamwm@eie.polyu.edu.hk

中, 由于节点需要掌握大量的信息, 因此对于一个大型网络来说, 这种策略变得不切合实际. 而局部路由策略中, 路由器只需掌握其邻居的信息. 最简单的策略是随机漫步<sup>[16,17]</sup>, 即随机地选择其中一个邻居, 而另外一种方法是优先选择一个节点度数大的邻居<sup>[18]</sup>. 此外, 基于无尺度网络, 人们对通信量阻塞问题也进行了研究<sup>[19~21]</sup>.

最近, Zheng 等<sup>[22,23]</sup> 利用复杂网络去构建低密度校验 (low density parity check, LDPC) 码. LDPC 码的二分图模型中有两种节点, 即变量节点和校验节点. 而 LDPC 的解码过程将涉及信息从变量节点传到校验节点, 再从校验节点传回变量节点. 因此, 传输路径越短, 信息就传播得越快. 而据知, 无尺度网络具有较短的平均路径长度. 因此假设变量节点的度数服从幂律分布, 可构造出与最佳码具有相近误码率的 LDPC 码.

电信系统 (包括固定电话系统和移动蜂窝系统) 的研究基本上都涉及到人类, 但很少有人会考虑到其潜在用户网络的准确结构. 最普遍的是, 假设网络是全互联的, 即所有用户都互相连接. 还有假设用户相互间以相同的概率打出 / 接听电话. 其相关的话务量模型还进一步假设呼叫到达的时间间隔 (即两个成功呼叫相隔的时间) 和服务时间 (即呼叫持续时间) 都服从指数分布. 换言之, 到达率和服务率都服从泊松分布<sup>[24,25]</sup>, 这种分布实际上是二项分布的一种接近.

在实际的环境当中, 网络几乎不可能达到全互联. 更现实的是, 用户网络中不同的用户将会有不同的熟人, 包括家人、亲戚、朋友和同事. 还有, 有些人有较多的熟人, 相对于其他有较少熟人的人来说, 他们更有可能打出 / 接听电话. 因此预料不同用户会有不同的话务量行为, 这样的观点在最近一篇关于长途电话的研究报告<sup>[26]</sup> 中得到了证实. 在这篇报告中, 我们可以发现少数的呼叫者 / 接听者打出 / 接听大量的电话, 而大多数的呼叫者 / 接听者只打出 / 接听很少的电话. 研究进一步显示呼叫者和接听者的数量以及打出 / 接听电话的数量都服从幂律分布. 换句话说, 这违背了在传统话务量分析中用户均等性的假设. 由此, 我们发觉无尺度模型才是一种更合适的用户网络模型<sup>[8]</sup>. 最近无尺度模型被用作固定电话系统中用户网络的模型, 结果显示, 用户的网络行为对呼叫话务量的影响很大, 主要是限制了话务

量<sup>[27]</sup>.

在移动蜂窝系统中, 其操作条件与固定电话系统有所不同. 在移动系统中, 地理区域分成较小的区域叫蜂窝, 信道指定给每个小区以提供服务给覆盖范围内的用户. 指定给每个小区信道的数量通常是固定的, 这意味着一旦所有分配的信道都被占用, 其他用户任何新的请求都会被拒绝. 固定电话系统和移动蜂窝系统的另一不同之处是, 移动蜂窝系统中的用户不是固定的, 而是会在小区与小区之间移动. 当一个移动用户从一个小区移到另一个小区时, 会释放当前服务区原来的信道, 而新的小区将会指定一条新的信道给他, 这样的处理过程叫越区切换. 但是, 如果新区在切换期间没有空闲的信道可提供的话, 正在进行中的呼叫将被迫中止. 过去, 用户假设以相同的移动性在区与区之间自由移动. 实际上, 由于各种各样的因素, 如工作种类等, 不同用户可能会有不同程度的移动性. 例如, 送货员有较高的移动性, 而白领文员则大部分时间逗留在办公室.

在这篇文章中, 假设潜在的用户网络为一个无尺度网络, 且用户的移动性服从幂律分布, 我们将研究移动蜂窝系统的性能, 包括承载话务量、新呼叫到达率、切换呼叫到达率和各种类型的呼叫阻塞率. 此外, 我们还会将这些结果与基于传统话务量模型所得到的结果相比较.

## 2 话务量模型

在移动蜂窝系统中, 新呼叫根据某种分布随机发起. 每个新呼叫将涉及呼叫方和被呼叫方. 考虑用户  $i$  呼叫用户  $j$  的情况, 对于用户  $i$  来说, 新呼叫被视为打出的呼叫, 而对于用户  $j$  来说, 却视为打入的呼叫. 当新呼叫成功建立起来时, 一对信道将会被占用, 呼叫者和被呼叫者双方都会对系统产生相同的话务量.

分别记打入和打出的呼叫到达率为  $\lambda_{in}$  和  $\lambda_{out}$ , 显然这两种到达率是相等的, 即  $\lambda_{in} = \lambda_{out}$ . 为了简单起见, 在其后的分析中, 我们将分别用  $\lambda$  和  $\mu$  表示打出呼叫的到达率和结束率 (即离去率)<sup>[24]</sup>, 则呼叫所提供的话务量 (即所有到达的呼叫尝试所产生的话务量) 强度可由下式计算

$$A = \frac{\lambda_{in} + \lambda_{out}}{\mu} = \frac{2\lambda}{\mu} \quad (1)$$

虽然话务量强度是无量纲的,但是它通常用爱兰 (erlang) 来量度 (以 E 来表示). 1E 的话务量强度表示一条信道在 1h 期间被占用了 60min.

图 1 描述了话务量的详细分类. 在提供的话务量当中,只有部分可以由系统成功地承载,该部分的话务量叫做承载话务量,其余的都属于丢失的话务量. 此丢失的部分是由新呼叫取消<sup>1)</sup>、新

呼叫阻塞和切换失败引起的. 新呼叫阻塞可以进一步分为由接收者繁忙和信道容量有限引起. 特别的是,接收者繁忙引起的阻塞与用户网络结构有着密切的关系. 另一方面,切换失败又依赖于用户的移动性. 因此,用户网络模型和移动性都会影响到移动蜂窝系统的性能.

假设用户  $i$  空闲,他想发起一个新的呼叫. 图 2

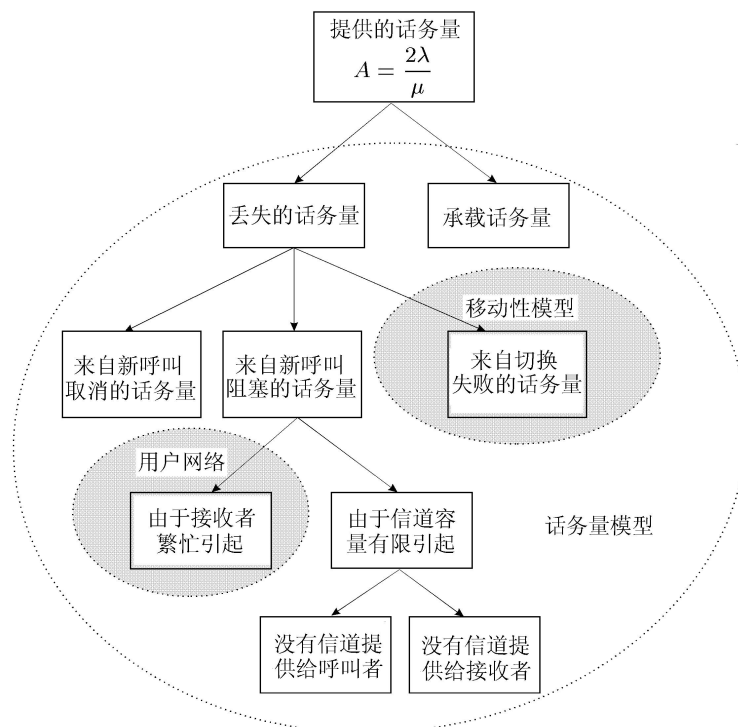


图 1 话务量的分类

说明了呼叫发起过程的流程以及其后呼叫的操作处理过程. 首先,用户  $i$  在他的通讯录里以等概率随机地选择一个熟人. 假设用户  $j$  被选中,如果没有空闲的信道提供给用户的其中一方,呼叫就会因容量有限而受到阻塞. 如果用户双方都有信道提供的话,那么就要检查用户  $j$  的状态. 如果他正忙于通话,呼叫将会因接收者繁忙而受到阻塞. 否则的话,新的呼叫将会成功建立. 在呼叫的处理过程当中,用户的移动性会受到密切监控. 每当用户移出原来的区域并进入到新的区域时,系统将会检查新区空闲信道的可供性. 假定没有空闲信道提供,正在通话中的呼叫将会因切换失败而中止. 否则,用户释放服务区的信道而

占用新区的一条新信道,此后,监控处理将会继续直到呼叫因通话完毕或切换失败而结束,在这两种呼叫结束的情况下,用户都会释放所占用的信道.

注意到通话中,所涉及的双方将不会发起和接收另一个呼叫,因此这是一对一的通话. 当通话完毕时,呼叫间隔将会产生给用户<sup>[27]</sup>,由此可得知下一个呼叫发起的时间. 如果在这段时间内没有打入的呼叫到达,用户在呼叫间隔末端时间发起另一呼叫给其中一位熟人. 在呼叫发起前,如果有呼叫打入且打入的呼叫是成功的话,那么原来的呼叫间隔就会变得无效. 而打入的呼叫结束后,新呼叫的间隔将会产生.

<sup>1)</sup> 如果一个用户正在通话时,他打算发起一个呼叫,那么这个呼叫将不能处理,这样的呼叫阻塞叫新呼叫取消.

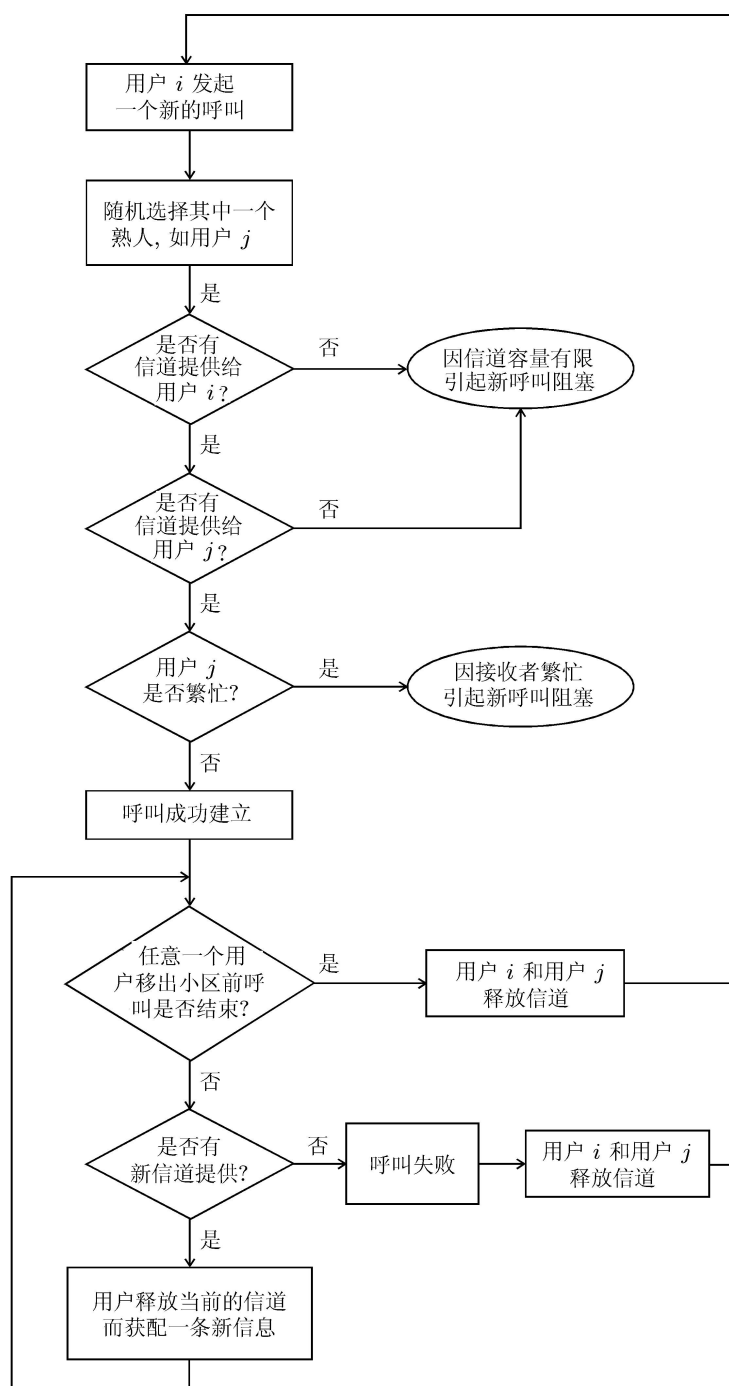


图 2 一个呼叫的流程图

### 3 用户网络

在我们的研究中, 复杂网络将用作移动系统中潜在的用户网络. 一个典型的复杂网络是由节点以及它们之间的连线所组成 [6]. 对于用户网络来说, 节点表示用户, 如果两个节点对应的用户是彼此认识的 (如家人、亲戚、朋友和同事关系), 那

么在它们之间建立一条连线. 假定移动系统包含有  $N$  个用户, 我们可以将用户网络的拓扑结构以一个连接矩阵的方式表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,N} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N,1} & R_{N,2} & \cdots & R_{N,N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果用户 } i \text{ 是用户 } j \text{ 的熟人} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

还有, 连接矩阵有以下的特征:

(1) 因为用户  $i$  不可以打给自己, 所以  $R_{ii} = 0$ .

(2) 因为用户  $i$  与  $j$  要么相识, 要么不相识, 所以  $R_{ij} = R_{ji}$ .

(3) 第  $i$  行或列之和给出用户  $i$  熟人的总数 (记作  $n_i$ ), 即

$$n_i = \sum_{j=1}^N R_{ij} = \sum_{j=1}^N R_{ji} \quad (4)$$

(4) 每行 (或列) 之和的平均给出移动系统中每个用户平均熟人的数目 (记作  $\bar{n}$ ), 即

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_{ij} \quad (5)$$

(5) 对于  $i = 1, 2, \dots, N$ , 如果用户  $i$  熟人的总数都等于  $\bar{n}$ , 那么网络就叫做均匀网络, 否则叫非均匀网络. 此外, 如果均匀网络中每个节点都连接到除自己以外的所有节点, 这样的网络叫全互联网络.

对于非均匀网络, 如果网络中节点连线的数目服从幂律, 即

$$Pr(n_i) \sim n_i^{-\gamma} \quad (6)$$

(这里  $\gamma > 0$  是一个尺度指数), 那么这种网络可归类为无尺度网络.

无尺度用户网络中节点度的概率分布, 如图 3 所示. 图中可观察到大多数用户只有几个熟人, 然而少数用户 (有时称为超级用户) 却有大量的熟人. 图 4 示出另一个具有 100 个节点的无尺度网络. 注意到 5 个超级用户 (以节点 1~5 来表示) 连接了大多数的用户.

在我们的研究中, 无尺度用户网络的构造步骤如下:

(1) 产生离散的随机变量  $n_i \geq 1$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 其分布服从幂律, 其中变量  $n_i$  代表用户  $i$  熟人的数目.

(2) 对于每一个  $n_i$ , 在用户  $i$  与其他用户之间任意建立连线. 注意到用户网络中的连线被看作

是双向的. 也就是说, 如果用户  $i$  是用户  $j$  的熟人, 那么反之亦然.

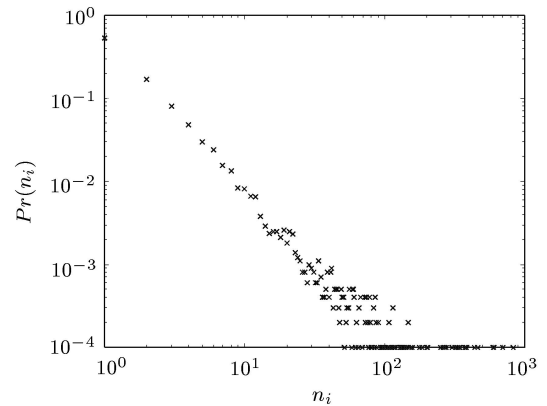


图 3 节点度的幂律分布,  $\bar{n} = 5$  及  $\gamma = 2.1$

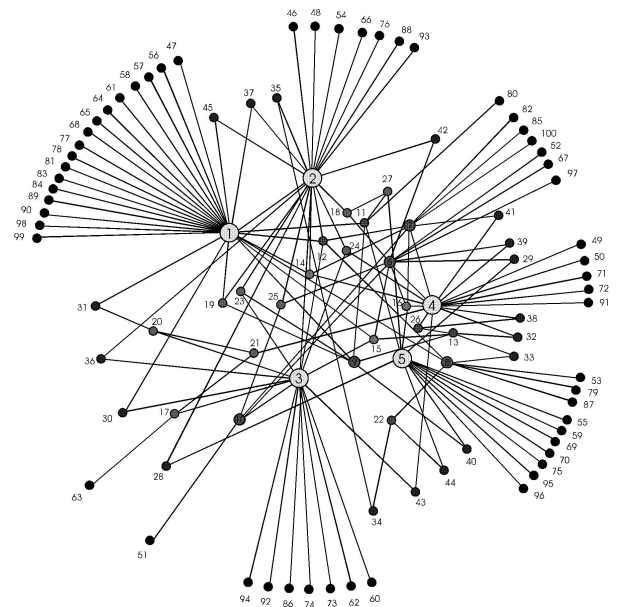


图 4 一个具有 100 个节点的无尺度网络,  $\bar{n} = 2.9$

### 4 移动模型

下面, 我们考虑移动蜂窝系统中有  $N$  个用户分布在  $M$  个小区的情况. 假设小区是相连的, 其  $M = 4$  的模型如图 5 所示. 开始时用户平均分配给小区, 即每个小区有  $N/M$  个用户. 随后, 用户将允许在小区间自由地移动, 这取决于他们的移动性. 当一个用户离开当前服务区的, 他会随机选择另一个小区进入. 例如, 逗留在小区 1 的用户会以等概率移到小区 2、小区 3 或小区 4. 这样在某一时刻, 每个小区用户的数量就不可能准确为  $N/M$ .

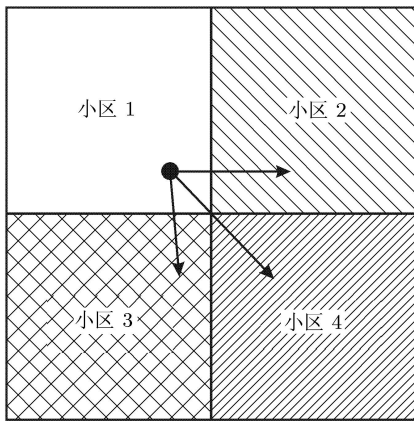
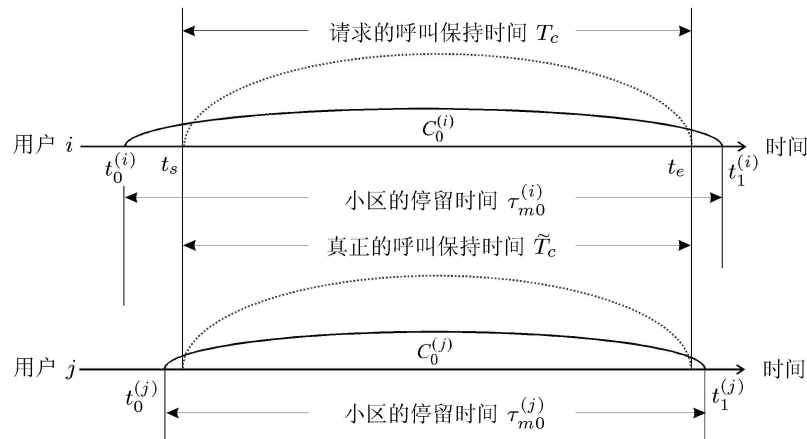


图 5 4 个小区的模型

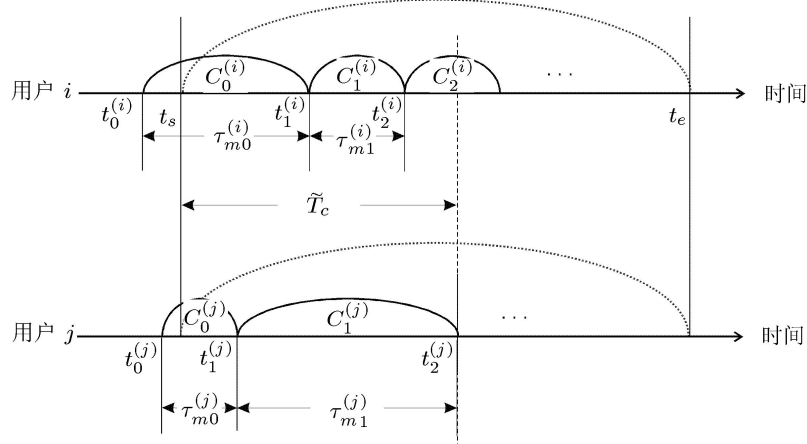
考虑用户  $i$  的某一个呼叫, 其请求的通话时间 (即呼叫保持时间) 为  $T_c$ , 并用  $C_0^{(i)}$  来表示用户

$i$  发起 / 接收呼叫时所在小区的标记. 假定用户在通话期间将穿越不同的小区边界  $K_i$  次 ( $K_i$  次过区切换), 记第  $k$  次穿越后所在的小区标记为  $C_k^{(i)}$ , 其中  $k = 0, 1, \dots, K_i$  以及  $C_k^{(i)} \in \{1, 2, \dots, M\}$ , 显然,  $C_{K_i}^{(i)}$  表示用户  $i$  通话完毕时所在小区的标记. 还有, 我们用  $\tau_{mk}^{(i)}$  ( $k = 0, 1, \dots, K_i$ ) 来表示用户  $i$  在小区  $C_k^{(i)}$  的停留时间 (即用户逗留在同一个小区的持续时间).

对于一个建立在用户  $i$  与用户  $j$  之间的典型呼叫, 其时间图如图 6 所示. 呼叫在  $t_s$  时开始, 并在  $t_e$  时结束, 所请求的保持时间为  $T_c = t_e - t_s$ . 当呼叫开始时, 用户  $i$  和  $j$  分别在小区  $C_0^{(i)}$  和  $C_0^{(j)}$ , 其相应的停留时间为  $\tau_{m0}^{(i)}$  和  $\tau_{m0}^{(j)}$ . 以下我们将描述呼叫建立可能发生的几种情形:

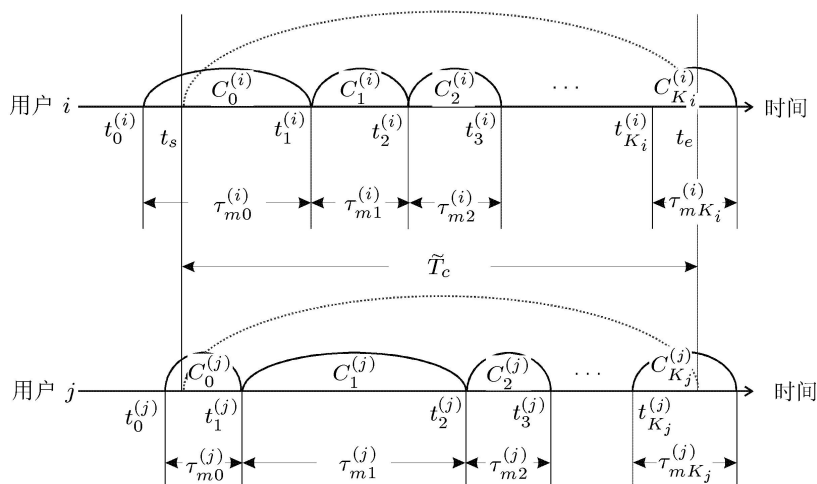


(a) 情形 1



(b) 情形 2

图 6 一个呼叫的时间图



(c) 情形 3

图 6 一个呼叫的时间图 (续)

情形 1: 没有过区切换. 呼叫者和被呼叫者在通话期间都留在当前的小区, 因此用户  $i$  和  $j$  将使用固定的一对信道直到通话完毕. 这样, 不需要执行过区切换, 呼叫就结束了. 因而真正的呼叫保持时间 (记作  $\tilde{T}_c$ ) 与所请求的呼叫保持时间相同, 即  $\tilde{T}_c = t_e - t_s = T_c$ .

情形 2: 过区切换失败. 在用户  $i$  和用户  $j$  的其中一次切换请求当中, 由于信道容量有限, 移动系统不能从新区分配一条信道给用户, 正在通话中的呼叫被迫中止. 参照图 6 中的例子, 在用户  $j$  第 2 次发出切换请求时, 即  $t_2^{(j)}$  时, 呼叫中止. 一旦切换失败, 真正的呼叫保持时间将小于所请求的呼叫保持时间, 即  $\tilde{T}_c < T_c$ . 在这个例子中,  $\tilde{T}_c = t_2^{(j)} - t_s$ .

情形 3: 过区切换成功且通话完成. 所有的切换请求 (用户  $i$  发出的  $K_i$  次请求及用户  $j$  发出的  $K_j$  次请求) 都能成功地执行. 因为通话可以完成, 所以真正的呼叫保持时间等于所请求的呼叫保持时间, 即  $\tilde{T}_c = T_c$ .

在以上的讨论中, 呼叫者和被呼叫者的过区切换都考虑在同一呼叫处理过程当中. 如果由用户  $i$  发出的一次切换请求失败的话, 那么正在进行的呼叫将不能继续且用户  $i$  和  $j$  其余的切换请求将会被取消.

### 5 仿真参数及性能指标

我们用以下的符号来表示移动蜂窝系统的参

数:

- (1)  $\lambda_i$ : 用户  $i$  的平均新呼叫到达率.
- (2)  $\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i$ : 对所有用户求平均后的平均新呼叫到达率, 其中  $N$  为系统内用户的总数;
- (3)  $1/\mu$ : 平均呼叫保持时间, 即呼叫从开始到结束的平均持续时间.
- (4)  $1/\theta_i$ : 用户  $i$  的平均小区停留时间, 相当于用户  $i$  逗留在同一个小区的平均持续时间.
- (5)  $c_l$ : 第  $l$  个小区的容量 (信道的数目).

此外, 我们还作了以下假设:

- (1) 用户  $i$  呼叫到达的时间间隔  $t$  服从指数分布, 其平均值为  $1/\lambda_i$ <sup>[24,26,27]</sup>, 即

$$f(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \tag{7}$$

式中,  $f(\cdot)$  代表概率密度函数 (pdf). 假设如果一个用户有大量熟人的话, 他将会有较高的机会发起或接收呼叫. 因此, 用户  $i$  的新呼叫到达率被视为与熟人的数目成比例, 即

$$\lambda_i = \alpha n_i \tag{8}$$

这里  $\alpha > 0$  是一个比例常数, 它将会决定所有用户的平均新呼叫到达率.

对于无尺度用户网络 (scale-free user network, SFUN) 来说, 不同的用户可以有不同数量的熟人, 因此  $\lambda_i$  也不同. 而对于全互联用户网络 (fully-connected user network, FCUN) 来说, 因为所有的用户都互相认识, 所以对于每个用户来说, 平均新呼叫到达率都相等.

在我们的研究中, 10000 个用户 (即  $N = 10000$ ) 任意指定给 4 个小区 (即  $M = 4$ ), 因此仿真开始前每个小区都包含 2500 个用户. 而且, 无尺度用户网络中用户平均熟人的数目假设为 5 (即  $\bar{n} = 5$ ) 及  $\alpha = 1/500$  呼叫 / 分钟 / 熟人. 为了确保公平地比较两个不同用户网络的移动系统的性能, 我们采用同一  $\bar{\lambda}$  值, 其值为 0.01 呼叫 / 分钟.

(2) 对于所有的用户, 假设呼叫保持时间  $T_c$  都服从以下的指数分布

$$f(T_c) = \mu e^{-\mu T_c} \tag{9}$$

仿真中, 假定平均保持时间  $1/\mu$  为 4 min, 则每个小区所能提供的最大话务量强度近似等于

$$A = \frac{2\bar{\lambda}N}{\mu M} = 200 E \tag{10}$$

(3) 一个用户逗留在同一个小区的时间 (称为小区停留时间,  $\tau_m$ ) 将决定用户的移动性. 也就是说, 小区停留时间越短, 移动性越高. 我们假设  $\tau_m$  的分布是指数分布, 其平均值为  $1/\theta_i$ <sup>[28]</sup> 及其 pdf 为

$$f(\tau_m) = \theta_i e^{-\theta_i \tau_m} \tag{11}$$

进一步, 我们将研究 3 种移动性模型. 在第 1 种模型中, 用户假设是固定不动的, 即他们具有零移动性 (zero mobility, ZM), 这等同于固定电话系统的研究<sup>[27]</sup>. 在第 2 种模型中, 所有用户都假设具有相同移动性 (identical mobility, IM), 即  $\theta_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i = \bar{\theta}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ . 对于最后一种模型, 称为幂律移动性 (power-law mobility, PLM) 模型, 我们考虑大量的用户 (如办公室工作人员) 逗留在服务区很长的时间, 而少数的用户 (如公共汽车或火车上的乘客) 却在小区与小区之间频繁地移动. 因此在这个模型中, 我们假设  $\theta_i$  服从幂律分布, 即

$$f(\theta_i) \sim \theta_i^{-\nu} \tag{12}$$

这里  $\nu > 0$  是一个尺度指数. 对于相同移动性和幂律移动性, 我们赋以相同的平均值给  $\theta$ , 其值为  $\bar{\theta} = 1/120$  (除非另外指定).

最后在仿真中, 我们将估计移动蜂窝系统中以下的性能指标:

(1)  $\bar{A}$ : 承载话务量. 它是在给定时间内 (即 1min) 服务所持续的时间之总和.

(2)  $p_{b1}$ : 容量有限引起的新呼叫阻塞率. 它是“容量有限引起阻塞的新呼叫的数目”与“新呼叫尝试的总数”之比率.

(3)  $p_{b2}$ : 用户繁忙引起的新呼叫阻塞率. 它是“用户繁忙引起阻塞的新呼叫的数目”与“新呼叫尝试的总数”之比率.

(4)  $p_b = p_{b1} + p_{b2}$ : 总的新呼叫阻塞率. 它等于“新呼叫阻塞的数目”与“新呼叫尝试的总数”之比率.

## 6 用户网络在不同移动性下的比较

本节中, 我们通过仿真比较全互联用户网络 (FCUN) 和无尺度用户网络 (SFUN) 分别在零移动性 (ZM)、相同移动性 (IM) 和幂律移动性 (PLM) 下的性能.

### 6.1 不受限的信道容量

首先, 我们考虑信道容量不受限制的情况, 即  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = \infty$ .

对于移动性模型 IM 和 PLM 下的 FCUN 和 SFUN, 图 7 给出切换呼叫到达率与平均小区停留时间的关系. 如图所示, 切换呼叫到达率随着平均小区停留时间的增加而减小, 其原因是较长的平均小区停留时间会使用户长时间逗留在同一小区, 因而切换率降低.

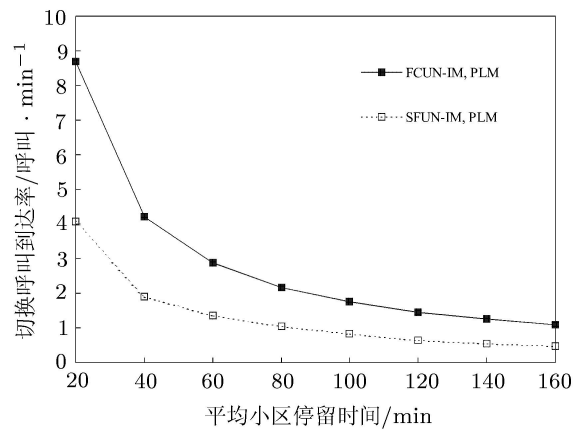


图 7 切换呼叫到达率与平均小区停留时间的关系

对于移动性模型 IM 和 PLM 下的 FCUN 和 SFUN, 图 8 给出承载话务量强度与平均小区停留时间的关系. 随着平均小区停留时间的增加, 承载话务量保持不变. 因停留时间可决定用户的移动性, 以至影响到系统的切换率, 但当假设信道的数目不受限制时, 所有的切换都能成功地执行, 没有呼叫因切换失败而引起中止, 所以停留时间对平

均承载话务量强度没有影响. 对于不同移动性模型下的 FCUN 和 SFUN, 图 9 给出对承载话务量强度的方差与平均小区停留时间的关系. 从图中可以观察到 ZM 情况下承载话务量的方差是最小的, 这是因为承载话务量的方差仅仅是由于话务量产生的“随机性”引起的. 在 IM 或 PLM 模型中, 用户移进移出小区引起承载话务量较多的变化. 对于 PLM 的情形, 很多用户具有较低的移动性, 正因为这些用户很少进出小区, 他们对小区的话务量引起最小的变化. 而大部分话务量的变化是由少数具有高移动性而又产生一定话务量的用户造成的. 对于 IM 模型, 话务量的方差最大, 这是由于所有用户都具有相同移动性且其合理高, 以致允许用户有实际的机会移进和移出小区. 正因

为较多用户在小区间移动, IM 产生较大的话务量方差.

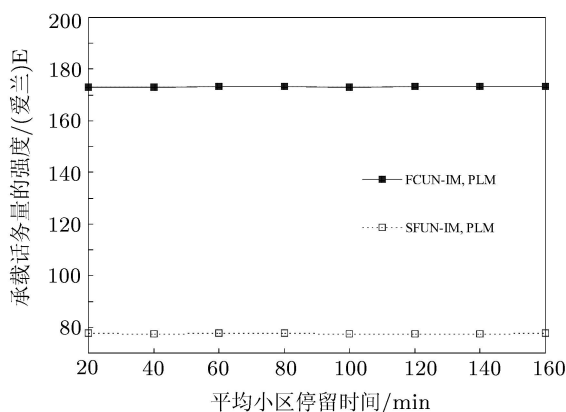
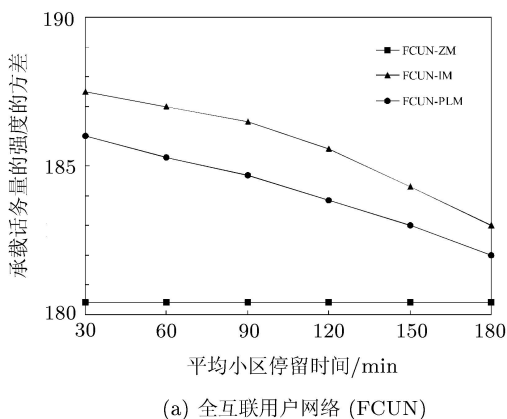
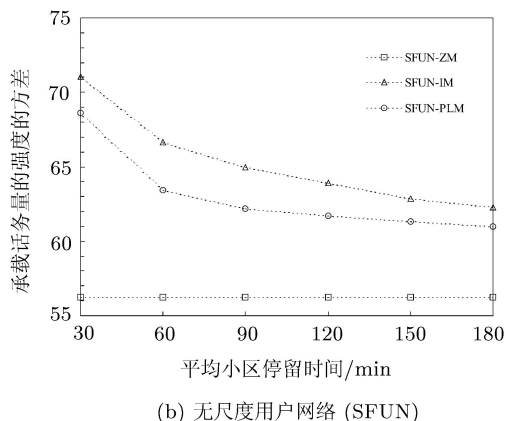


图 8 承载话务量强度与平均小区停留时间的关系



(a) 全互联用户网络 (FCUN)



(b) 无尺度用户网络 (SFUN)

图 9 承载话务量强度的方差与平均小区停留时间的关系

### 6.2 有限的信道容量

在实践的环境当中, 分配给每个小区信道的数目是有限的, 这里我们假设所有小区信道的数目都相等, 即  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$ .

对于不同移动性模型下的 FCUN 和 SFUN, 图 10 示出承载话务量强度与每个小区容量的关系. 如图所示, 承载话务量随着信道容量增加到一定值时, 将保持不变. 另外我们还可以发现, 当门限容量为 200 信道时, FCUN 的承载话务量达到 173E. 而对于 SFUN, 当门限值为 100 时, 承载话务量只有 77.5E. 这个门限值所指示的正是系统对信道容量的需求值, 它对小区的资源计划会很有帮助. 还有, 从图中可看到, 移动性模型对承载话务量没什么影响.

图 11 示出 FCUN 和 SFUN 的新呼叫和切换呼叫到达率与容量之间的关系. 对于两种用户网络,

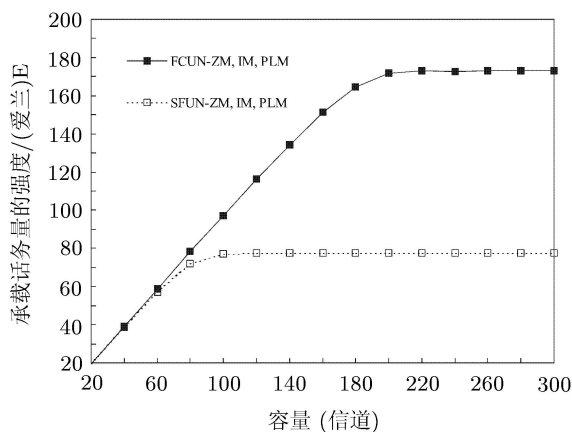


图 10 承载话务量强度与小区容量的关系

我们发现 IM 和 PLM 模型具有相似的新呼叫和切换呼叫到达率. 比较 FCUN 和 SFUN 可知, SFUN 的新呼叫到达率较低. 对于 SFUN, 新呼叫主要是由超级用户产生的. 因为超级用户认识大量的用

户, 他们有较多机会涉及到打入的呼叫, 所以很多计划要打出的电话会被取消, 以致降低了总的新呼叫到达. 而对于 FCUN, 呼叫在所有用户间均匀地产生, 且每个用户正忙于通话的概率相对较低, 因此产生较多的新呼叫到达. 还有, 因为相对于 SFUN 来说, 对应于 FCUN 的移动系统承载较多的话务量, 所以产生较多的过区切换.

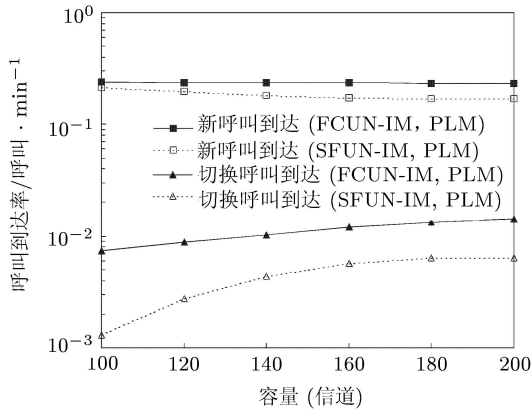
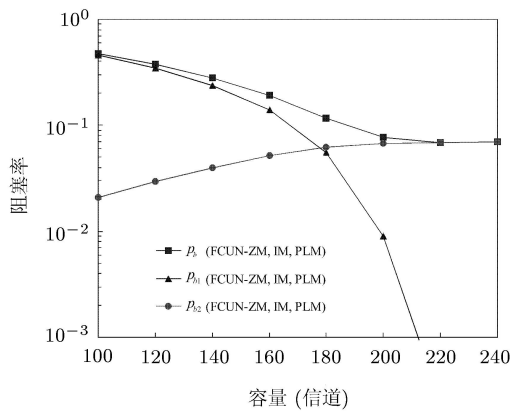
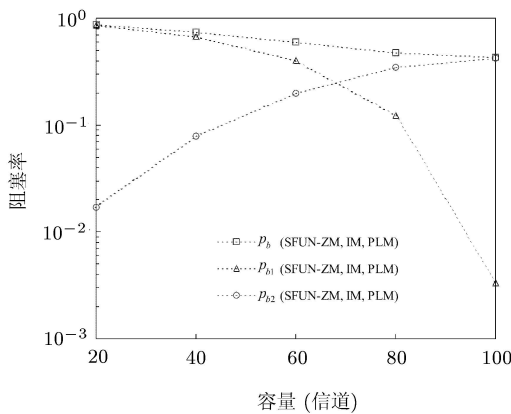


图 11 新呼叫和切换呼叫到达率与容量的关系

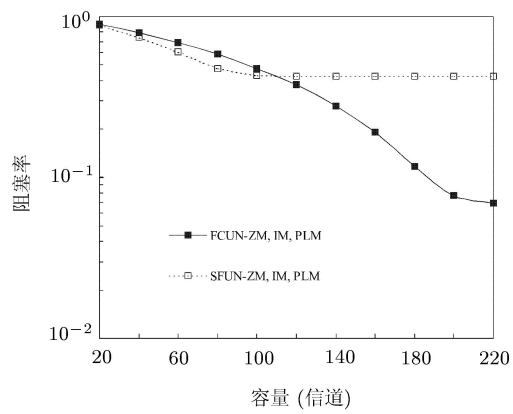
对于不同移动性模型下的 FCUN 和 SFUN, 图 12 给出各种新呼叫阻塞率与容量的关系. 图中,  $p_{b1}$  和  $p_{b2}$  分别代表容量有限以及用户繁忙引起的新呼叫阻塞率.  $p_b$  等于这两个概率之和. 当容量较低时, 用户难以获得一条空闲信道去建立一个呼叫, 因此, 容量有限引起的新呼叫阻塞率  $p_{b1}$  比较高. 正因为低容量只能维持少数人同时通话, 所以大多数的用户都空闲, 用户繁忙引起的新呼叫阻塞率  $p_{b2}$  就比较低. 当容量增加时, 系统有更多的信道可提供, 则  $p_{b1}$  下降. 同时, 更多的用户正忙于通话将引致  $p_{b2}$  增加. 因此, 总的新呼叫阻塞率  $p_b$  在信道容量较低时受  $p_{b1}$  支配, 而在信道容量较高时受  $p_{b2}$  支配. 我们还可以观察到, 不同移动性模型的阻塞率非常相似. FCUN 和 SFUN 的新呼叫阻塞率如图 12(c) 所示, 当到达门限容量时, SFUN(受制于用户繁忙引起的阻塞) 比 FCUN 造成更高的阻塞率. 结合 SFUN 具有较高的阻塞率和较低的新呼叫到达率 (见图 11), 可推断出, SFUN 的承载话务量比 FCUN 少 (见图 10).



(a) 全互联用户网络 (FCUN)



(b) 无尺度用户网络 (SFUN)



(c) 移动性模型 PLM 下的 FCUN 和 SFUN

图 12 总的新呼叫阻塞率  $p_b$ 、容量有限引起的新呼叫阻塞率  $p_{b1}$  以及用户繁忙引起的新呼叫阻塞率  $p_{b2}$  与容量的关系

最后, 我们研究平均新呼叫到达率  $\bar{\lambda}$  对切换呼叫到达率的影响. 假设平均小区停留时间为 30 min, 即  $\bar{\theta}=1/30$ . 并且对于 FCUN 和 SFUN, 分别分配 120 和 80 条信道给每个小区, 这是因为当  $\bar{\lambda}=0.008$  时, 这样的信道数目可以使得 SFUN 和 FCUN 具有相同的切换失败率. IM 和 PLM 模型的切换呼叫到达率如图 13 所示. 随着平均呼叫到达率增加, 会有更多的话务量产生, 且预料有更多的切换请求. 但是, 由于信道容量有限的问题, 呼叫阻塞以及切换失败也有所增加. 对于 IM 模型, 随着呼叫到达率增大, 切换呼叫到达率有净增加. 但对于 PLM 模型, 事实上切换呼叫率却有轻微的下降, 其原因是具有高移动性的用户有较大的机会因切换失败而掉线, 一旦电话结束, 随后假定要进行的切换将不再出现, 因而, 总的切换呼叫到达率将会下降.

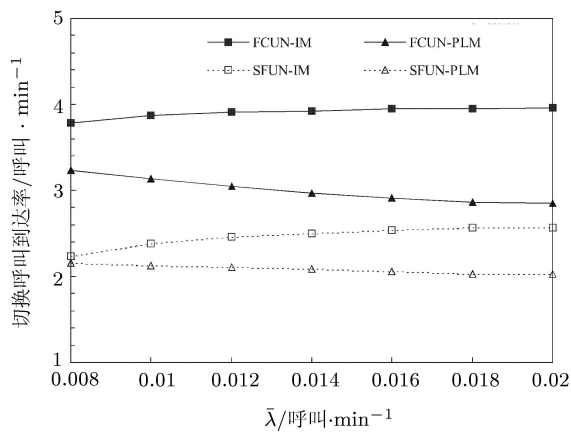


图 13 切换呼叫到达率与  $\bar{\lambda}$  的关系

## 7 结论

在这篇文章中, 基于两种不同的用户网络结构, 即全互联用户网络 (FCUN) 和无尺度用户网络 (SFUN), 我们研究了移动蜂窝系统的性能. 用于传统分析中的 FCUN 假设所有的用户都可以互相打电话. 然而, 为了更准确地模仿用户的行为, SFUN 假设一个用户熟人的数目服从幂律分布. 此外, 我们还仿真了 3 种移动性模型, 分别称为零移动性 (ZM)、相同移动性 (IM) 和幂律移动性 (PLM). 结果显示, 用户模型对移动蜂窝系统的性能有很大的影响. 例如, SFUN 的承载话务量比 FCUN 少, 其原因是在 SFUN 中, 大量的呼叫由于接收者很可能繁忙而受到阻塞. 还有, 移动模型对承载话务量

的方差也有很大的影响.

未来, 我们将考虑潜在用户网络的连接矩阵不是对称的情况, 这种情况将变得更加真实. 因为在现实生活中, 很多人会打到商务热线查询资料, 而这些热线却不会经常打出电话. 而另一极端是, 电话中心会发起很多的呼叫, 例如进行民意调查或产品销售, 但是却很少有电话打到这些中心. 还有, 我们将会考虑连接矩阵的权重, 使得当一个人打电话时, 有些熟人比起其他人来说会有较高的机会 (更频繁) 被呼叫.

## 参考文献

- 1 Erdos P, Rényi A. On the evolution of random graphs. *Publ Math Inst Hung Acad Sci*, 1959, 5: 17~60
- 2 Bollobas B. *Random Graphs*. London: Academic, 1985
- 3 Milgram S. The small world problem. *Psychology Today*, 1967, 2: 60~67
- 4 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393: 440~442
- 5 Kleinberg J M. Navigation in a small world. *Nature*, 2000, 406: 845~845
- 6 Strogatz S H. Exploring complex networks. *Nature*, 2001, 410: 268~276
- 7 Boots M, Sasaki A. 'Small worlds' and the evolution of virulence: infection occurs locally and at a distance. *Proc R Soc Lond*, 1999, B266(1432): 1933~1938
- 8 Wang X F, Chen G. Synchronization in scale-free dynamical networks: robustness and fragility. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 2002, 49: 54~62
- 9 Baraási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286: 509~512
- 10 Albert R, Baraási A-L. Topology of evolving networks: local events and universality. *Physical Review Letters*, 2000, 85: 5234~5237
- 11 Yook S, Jeong H, Barabási A L. Modeling the internet's large-scale topology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(21): 13382~13386
- 12 Zhou S, Mondraón R J. Accurately modeling the internet topology. *Physical Review E*, 2004, 70: 066108
- 13 Chen G, Fan Z P, Li X. Modeling the complex internet topology. In: *Complex Dynamics in Communication Networks*. New York: Springer-Verlag, 2004
- 14 Zhao L, Park K, Lai Y C. Attack vulnerability of scale-free networks due to cascading breakdown. *Physical Review E*, 2004, 70: 035101
- 15 Zhao L, Lai Y C, Park K, Ye N. Onset of traffic congestion in complex networks. *Physical Review E*, 2005, 71: 026125
- 16 Moura A P S. Fermi-Dirac statistics and traffic in complex networks. *Physical Review E*, 2005, 71: 066114
- 17 Eislser Z, Kertész J. Random walks on complex networks with inhomogeneous impact. *Physical Review E*, 2005, 71: 057104

- 18 Wang W X, Wang B H, Yin C Y, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network. *Physical Review E*, 2006, 73: 026111
- 19 Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the internet topology. *Computer Communication Review*, 1999, 29(4): 251~262
- 20 Xia Y, Tse C K, Lau F C M, et al. Traffic congestion analysis in complex networks. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2006-05-21~24, USA IEEE CAS Society, Kos Island, Greece, 2006. 2625~2628
- 21 Arrowsmith D, Bernardo M, Sorrentino F. Communication models with distributed transmission rates and buffer sizes. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2006-05-21~24, USA IEEE CAS Society, Kos Island, Greece, 2006. 5047~5050
- 22 Zheng X, Lau F C M, Tse C K. Study of LDPC codes built on scale-free networks. In: Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Japan: Research Society of Nonlinear Theory and its Applications. 2006-09, Bologna, Italy, 2006. 563~566
- 23 郑霞, 刘重明, 谢智刚等. 对于在复杂网络中构造低密度校验码的研究. 见: 中国电子学会第二十届电路与系统学术年会, 广州: 中国电子学会电路与系统分会. 2007-06-15~17. 广州, 中国, 2007. 527~530
- 24 Bellamy J C. Digital Telephony. New York: Wiley, 2000
- 25 Gross D, Harris C M. Fundamentals of Queuing Theory. Chapter 1. New York: John Wiley & Sons, 1998
- 26 Aiello W, Chung F, Lu L. A random graph model for massive graphs. In: Proceedings of 32nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing. ACM Special Interest Group on Algorithms and Computation Theory. 2000-05. Portland, USA, 2000. 171~180
- 27 Xia Y X, Tse C K, Tam W M, et al. Scale-free user network approach to telephone network traffic analysis. *Physical Review E*, 2005, 72: 026116
- 28 Hung H N, Lee P C, Lin Y B, Peng N F. Modeling channel assignment of small-scale cellular networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 646~652

## STUDY ON MOBILE COMMUNICATIONS WITH A COMPLEX UNDERLYING USER NETWORK\*

TAM Waiman<sup>†</sup> LAU Chungming TSE Chikong

Department of Electronic and Information Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

**Abstract** In the traditional study of mobile cellular systems, all users are assumed to have the same behaviour: they have the same probability of making/receiving a call, and they will move around the network with identical mobility. Moreover, the underlying user network is assumed to be fully connected, implying that all users know each other and they will communicate with each other with the same probability. In a practical environment, each user has a different list of acquaintances including relatives, friends and colleagues, with whom the user is most likely to make contact, and the size of the list varies with individual users. In addition, different users will acquire different levels of mobility, depending on various factors such as job or age. To evaluate the performance of a mobile cellular system more realistically, we model the user network with a scale-free network in which the number of acquaintances of a user follows a power-law distribution. Moreover, the mobile system is studied under three user mobility distributions: zero mobility, identical mobility and power-law mobility. Finally, the system performance indicators, such as the carried traffic and the blocking probabilities, are evaluated based on computer simulations, which show that both the user network configuration and the mobility of users affect the performance of the mobile system.

**Keywords** complex network, fully-connected network, scale-free network, mobile cellular system, blocking probability, mobility

\* The project supported by the Research Foundation of Hong Kong Polytechnic University (G-YF51)

<sup>†</sup> E-mail: tamwm@eie.polyu.edu.hk