

# 分层网络中基于马尔可夫决策过程的能效优先的 接纳控制和业务转移算法

潘 军, 张文逸

(中国科学技术大学无线网络通信实验室, 安徽合肥 230027)

**摘要:**在分层蜂窝网络中,为了改善网络的性能,同时部署了宏基站和家庭基站.考虑各种切换以及新到达业务,以阻塞率和掉话率为约束条件,以最大化系统平均能量效用回报函数为目标,将宏基站/家庭基站分层网络的接纳控制和业务转移问题建模成马尔可夫决策过程优化问题.当家庭基站中有空闲资源时,可以将连接到宏基站而处在家庭基站覆盖范围的业务切换到家庭基站中.通过求解线性方程得到最优的接纳策略.仿真结果表明,最优接纳和转移策略在获得最大的平均效用的情况下,有效提高了家庭基站的资源利用率,降低了业务阻塞率和掉话率;同时,宏基站的资源利用率降低使得它可以为更大覆盖范围内的用户提供服务.

**关键词:**接纳控制,家庭基站,分层网络,马尔可夫决策过程

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.02.009

**引用格式:** Pan Jun, Zhang Wenyi. Energy efficiency priority admission control and service transfer algorithm based on Markov decision processes in hierarchical networks[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(2):138-146.

潘军, 张文逸. 分层网络中基于马尔可夫决策过程的能效优先的接纳控制和业务转移算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2):138-146.

## Energy efficiency priority admission control and service transfer algorithm based on Markov decision processes in hierarchical networks

PAN Jun, ZHANG Wenyi

(Wireless Information Network Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In a hierarchical cellular network environment, both macrocell and femtocell are deployed to improve network performance. The admission control problem for hierarchical network was addressed when all types of handovers were considered. The admission control and service transfer problem was formulated as a Markov decision process (MDP) optimization problem with constraints on the blocking probability and dropping probability and the objective of maximizing the average system energy efficiency reward function. When there are idle resources in a femtocell, the services connected to a macrocell with users located in the coverage of the femtocell could be chosen to be handed over to the femtocell. The

收稿日期:2013-05-02;修回日期:2013-06-24

基金项目:国家重大科技专项基金(2011ZX03001-006-01)资助.

作者简介:潘军,男,1985年生,博士生.研究方向:下一代无线通信技术. E-mail: panj@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:张文逸,教授. E-mail: wenyizha@ustc.edu.cn

optimal policy is obtained by solving a linear programming problem. Simulation results show that the proposed energy efficiency priority admission control and transfer strategy effectively improves the resource utilization of the femtocell with the maximum reward, and decreases blocking probability and dropping probability. Meanwhile, reducing resource utilization of the macrocell will make it possible to provide services to users within a larger coverage area.

**Key words:** admission control; femtocell; hierarchical network; Markov decision process

## 0 引言

家庭基站(femtocell)是一个低功耗小型化的蜂窝基站,工作在授权频谱,一般被部署在家庭室内、办公环境或者小的商业机构使用,用以改善无线网络的室内覆盖和容量<sup>[1]</sup>.它的出现改变了传统的宏蜂窝网络架构,出现了宏基站/家庭基站分层网络结构,不仅给用户带来了更多的接入选择,同时也增加了用户在基站之间切换事件的发生频率.

传统的无线网络主要设计着重于带宽、容量以及公平性等性能参数.然而,不断增加的移动用户以及业务量负载使无线网络的能耗也日益上升,不仅增加了运营商的运行成本,大量排放的CO<sub>2</sub>也严重污染了环境.对全球变暖和环境保护的关注,使得在下一代的无线网络建设过程中人们将更多的注意力转向能效研究,即绿色通信<sup>[2]</sup>.国内外启动了很多项目来降低无线通信网络的能耗,OPERA-Net, GR和EARTH项目应运而生.EARTH项目聚焦于移动通信网络的能效研究,包括新一代的节能设备、部署策略以及网络管理解决方案,目标是将移动通信网络的能耗降为原来的1/2<sup>[3]</sup>.在整个无线通信系统的功耗中,包括核心网、基站以及用户终端,大约80%来自于基站,它包括基站主设备、空调以及其他配套设备<sup>[4]</sup>.相关研究表明,降低基站主设备能耗可以带动基站其他设备能耗的降低.因此人们将能效研究的重点集中在如何减小基站的功耗.目前的基站节能技术有:基站相关的硬件的优化设计、动态的基站控制策略、小区间协作、通信协议的优化和无线资源管理等技术.本文从能效优先的角度出发研究无线资源的接入与切换技术.

能效定义为网络承载的用户业务总量与所消耗的总能量之比,即单位能量平均所承载的用户业务量<sup>[5]</sup>.由于宏基站和家庭基站在覆盖范围和发送功率上相差较大,对于新到达业务以及切换业务来说,接入不同的基站带来的能效是不同的,所以进行接纳控制是非常必要的,它的策略影响着整个网络的

资源使用的效能.分层网络的接纳控制问题即根据网络状态以及到达的业务类型,做出是否接纳以及接纳到何种网络的接纳决策.

目前,已经有很多关于接纳控制的研究成果出现.文献[6]提出了基于马尔可夫决策过程的接纳控制方案,在为不同级别的用户业务提供差异性对待并有一定的公平性保证的前提下,以最大化系统的利用率为目标.文献[7]针对蜂窝/WLAN系统中的新业务以及切换业务,提出了区分业务的接纳控制方案,考虑了两种网络不同的QoS支持能力以及语音和数据业务的各自特性.文献[8]在限制家庭基站用户QoS的基础上,提出了基于OFDMA的家庭基站分层网络中针对频谱共享的最优接纳控制方案,并且发展了一个分布式负载均衡算法,该算法可以与接纳控制方案相结合,提高了网络的吞吐量,减小了家庭基站的能量开销.文献[9]针对具有不同优先级的各类业务,提出了不同约束条件下的基于马尔可夫决策过程的接纳控制算法,在满足各类业务阻塞率和掉话率约束的条件下,有效提高了平均效用.

然而,这些接纳控制算法没有以整个网络的能量效率为优化目标,由于宏基站的发送功率远大于家庭基站,当用户处在家庭基站覆盖范围却连接到宏基站时,将产生较大的跨层干扰;同时,当有业务离开家庭基站时,释放的部分资源直到下一业务请求被接纳时才会被占用,有一段时间无线资源处于空闲状态,导致家庭基站的资源利用率不高;此外,这些方案也没有考虑连接到宏基站的业务在家庭基站区域的移动性.可以考虑在对新业务以及切换业务进行接纳控制的同时,将处于重叠覆盖区域内的部分业务由功耗大的基站转移到拥有空闲资源的功耗小的基站中,不仅可以节省能耗,而且减小了跨层干扰.

本文对分层无线网络的业务接纳控制机制进行了研究,利用马尔可夫决策过程模型<sup>[10]</sup>,定义了系统的状态空间、决策时刻、行为集以及状态转移概

率,并给出了不同状态下的能效回报函数,在满足阻塞率与切换率的约束条件下,求解线性规划方程得到最优的业务接纳和转移策略.仿真结果表明,最优接纳机制在相同的业务阻塞率和掉话率限制条件下,不仅获得最大的平均效用,而且有效提高了家庭基站资源的利用率.

## 1 系统模型

考虑一个无线分层蜂窝网络,它由一系列的宏基站和家庭基站组成,研究该无线蜂窝网络的业务接纳控制和转移问题.本文考察的业务是对实时性和传输速率要求都比较高的流媒体业务,并假设网络分配给所有业务的带宽资源相同且均能满足要求.

我们先关注其中的一个宏基站小区,如图 1 所示,它是宏基站/家庭基站分层无线网络,在一个宏基站的覆盖范围内有一个家庭基站小区.我们将整个分层网络分成宏基站区域和家庭基站区域,其中后者为重叠覆盖区域,前者为除去家庭基站区域的宏基站的覆盖范围.分析的业务有以下几种情形:①在该分层网络中宏基站区域内新产生的业务;②在该分层网络中家庭基站区域内新产生的业务;③由家庭基站切换到宏基站的业务;④由宏基站切换到家庭基站的业务;⑤由相邻分层网络进入该分层网络的业务.宏基站区域的只能接入到宏基站,而家庭基站区域的可以选择宏基站或者家庭基站接入.

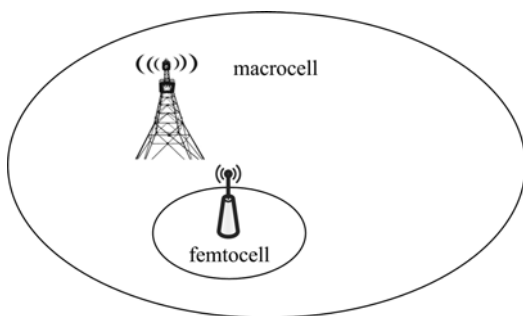


图 1 分层无线网络模型

Fig. 1 Model of hierarchical wireless network

假设新业务到达宏基站区域和家庭基站区域的过程均服从泊松分布,用户在宏基站小区和家庭基站小区内的逗留时间  $T_{R,m}$  和  $T_{R,f}$  分别服从参数为  $\mu_m$  和  $\mu_f$  的指数分布,业务的持续时间  $T_C$  服从参数为  $\mu_c$  的指数分布,与它接入的小区无关.首先分析被接纳到宏基站的新产生的业务,它有两种离开某

个小区的情形:①在用户离开该小区之前业务已结束;②业务一直持续到用户离开该小区,有切换发生.由于指数分布的无记忆性,业务在宏基站小区内的网络连接时间为  $\min\{T_{R,m}, T_C\}$ ,分析可知该网络连接时间服从参数为  $\mu_c + \mu_m$  的指数分布,进一步可得该业务的切换过程服从泊松分布.类似的,对于连接到家庭基站的新产生的业务以及分层网络的所有切换业务都也有相似的结果,即对宏基站小区以及家庭基站小区来说,业务的到达和离开过程均服从泊松分布.

在传统的分层无线网络业务接纳控制方案中,对于新到达的业务或者切换业务接入请求来说,网络依策略采取接受或者拒绝行为,在满足整体网络性能和用户 QoS 的基础上,将更多的业务接入到效用更大的基站中.但这种接纳控制的问题在于:当有业务离开基站时,将释放出它之前占用的所有带宽资源,直到下一个到达业务请求被基站接纳,该空闲带宽资源才会再次被利用.可见,在前一个业务离开的时刻与下一个到达业务被接纳时刻的时间间隔内,被释放的带宽资源一直处于空闲状态,直接导致了效用大的基站的资源利用率不高,对于能效优先的网络来说,这是不可接受的.

针对分层网络中存在的这种高效资源得不到充分利用的问题,可以在进行接纳控制的同时,进一步考虑将处在家庭基站覆盖范围内且连接到宏基站中的业务转移到家庭基站中,则带来的结果是在服务相同业务量的同时,消耗了更少的能量,能效得到了提高.这种业务转移行为是指网络在发现目标家庭基站有空闲资源的情况下,由当前宏基站向目标家庭基站发起切换,将与宏基站连接且处在家庭基站覆盖范围内的业务转移到家庭基站.网络对于这种转移的切换业务都采取接受策略.由前面的分析可知,对于这种转移的切换业务,它在新小区的离开过程仍服从参数相同的泊松分布.

显然,在传统的接纳控制的基础上,考虑进行业务转移行为后,改变了接纳控制以后宏基站和家庭基站之间的业务负载分配,会影响分层网络业务的阻塞率、掉话率和能效等性能,继而会影响后续到达业务的接纳控制策略,何时以及是否进行业务转移是问题的关键所在.

可见,整个无线蜂窝系统的业务接纳控制和转移问题可以分割成研究上述的单个分层网络的业务接纳控制和转移问题.

## 2 接纳控制和业务转移策略

下面将分层网络中业务的接纳控制和转移问题建模为一个马尔可夫决策过程模型. 当分层网络的各个小区中有新业务或者切换业务到达时, 网络根据当前系统状态做出接受或者拒绝该业务的策略, 当家庭基站中有空闲资源时, 针对处在家庭基站覆盖范围而连接到宏基站的业务, 做出转移决策. 在满足将业务阻塞率和掉话率限制在一定水平的前提下, 求解得到最优的业务接纳和转移策略, 通过控制接入各基站的业务个数以及业务转移, 实现分层网络的能效最大.

### 2.1 状态空间

在本文中, 考虑宏基站小区中有一个家庭基站小区. 由于用户在宏基站区域和家庭基站区域的移动性不同, 我们将分层网络内的用户分为以下 3 类: 连接到家庭基站的用户、连接到宏基站且处于宏基站区域的用户、连接到宏基站且处于家庭基站区域的用户,  $n_t$ ,  $n_m$  和  $n_{m,t}$  分别对应表示这 3 类用户业务的个数. 可以将连接到宏基站且处于家庭基站区域的用户业务转移到家庭基站, 由于指数分布的无记忆性, 在任意时刻被转移到家庭基站的业务的持续时间以及逗留时间均仍服从指数分布, 对家庭基站来说, 业务转移可以选择其中的任何一个业务, 效果相同. 在决策时刻, 系统的状态空间  $S$  可以表示为

$$S = [n_t, n_m, n_{m,t}] \quad (1)$$

式中,  $0 \leq n_m + n_{m,t} \leq N_m$ ,  $0 \leq n_t \leq N_t$ ,  $N_m$  和  $N_t$  分别表示宏基站和家庭基站可承载的最大用户业务个数. 本文假设各基站所能承载的最大业务个数均是常数.

### 2.2 决策时刻

当分层网络中有新业务或者有切换业务到达时, 网络根据当前的系统状态和业务类型做出接纳决策. 当有业务离开小区时, 各网络的信道使用情况也将发生变化. 当家庭基站中有业务离开时, 将进行业务转移决策, 假设它们是同时发生的, 考虑将某个处在家庭基站覆盖区域且连接到宏基站的业务转移到家庭基站, 因此将所有业务到达和离开的时刻定义为决策时刻.

### 2.3 行为集

马尔可夫决策过程中, 在决策时刻, 网络对到达新业务和切换业务的接入请求所做出的接纳决策以及业务转移决策统称为行为.

对于宏基站区域, 到达的业务有新业务、由相邻分层网络切换过来的业务以及由家庭基站切换到达的业务, 这些业务在决策时刻可以接入的网络只有宏基站. 定义对该区域到达业务的接纳行为:

$$a_m = \{(a_{m,1}, a_{m,2}, a_{m,3}) : a_{m,i} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3\} \quad (2)$$

式中,  $a_{m,1}$  表示对新业务的接纳行为,  $a_{m,2}$  表示对相邻分层网络切换过来的业务的接纳行为,  $a_{m,3}$  表示对家庭基站切换过来的业务的接纳行为;  $a_{m,i} = 1$  表示到达业务被接纳到宏基站,  $a_{m,i} = 0$  表示拒绝该接入请求.

对于家庭基站区域, 到达的业务有新业务以及由宏基站切换到达的业务, 这些业务在决策时刻可以接入宏基站或者家庭基站. 定义对家庭基站区域到达业务的接纳行为:

$$a_t = \{(a_{t,1}, a_{t,2}) : a_{t,1} \in \{0, 1, -1\}, a_{t,2} \in \{0, 1\}\} \quad (3)$$

式中,  $a_{t,1}$  表示对新业务的接纳行为,  $a_{t,2}$  表示对宏基站切换过来的业务的接纳行为;  $a_{t,1} = 1$  表示到达业务被接纳到宏基站,  $a_{t,1} = -1$  表示被接纳到家庭基站,  $a_{t,1} = 0$  表示拒绝该接入请求,  $a_{t,2} = 1$  表示宏基站切换到家庭基站的业务被接纳到家庭基站,  $a_{t,2} = 0$  表示宏基站切换到家庭基站的业务被拒绝而继续连接到宏基站.

对于业务转移行为, 当家庭基站中出现空闲资源时, 将处在家庭基站区域而连接到宏基站的业务转移到家庭基站, 这不仅可以减小宏基站的负载以及能耗, 而且降低了干扰. 可见, 转移行为只会发生在家庭基站有业务离开时, 且每次只会转移 1 个用户, 假设它们同时发生. 定义转移行为:  $a_i \in \{0, 1\}$ , 其中  $a_i = 1$  表示将业务转移到家庭基站,  $a_i = 0$  表示不采取转移行为.

因此, 行为集为

$$A = \{(a_m, a_t, a_i)\} \quad (4)$$

规定当网络状态为  $s = [0, 0, 0]$  时, 到达宏基站区域的业务被接纳到宏基站, 到达家庭基站区域的业务被接纳到家庭基站. 在状态  $s$ , 分层网络的行为集为

$$A_s = \{a \in A : a_{m,i} \neq 1, \text{ if } n_m + n_{m,t} = N_m ; \\ a_{t,i} \neq -1, \text{ if } n_t = N_t ; \\ a_i = 0, \text{ if } n_t = N_t \text{ or } n_{m,t} = 0 ; \\ a_{m,i} = 1, a_{t,i} = -1, \text{ if } s = [0, 0, 0]\} \quad (5)$$

## 2.4 状态转移概率

假设新业务以泊松到达率  $\lambda_m$  到达宏基站区域, 以泊松到达率  $\lambda_f$  到达家庭基站区域, 由相邻分层网络切换到宏基站区域的业务到达率为  $\lambda_{m,h}$ , 用户在家庭基站小区和宏基站小区内的逗留时间分别服从参数为  $\mu_f$  和  $\mu_m$  的指数分布, 业务的持续时间服从参数为  $\mu_c$  的指数分布, 宏基站的业务由于用户的运动特性而切换到不同的目标基站, 假设宏基站的所有切换业务均以概率  $p$  切换到家庭基站, 以概率  $1-p$  切换到相邻分层网络. 因此, 总的业务到达率为  $\lambda = \lambda_m + \lambda_{m,h} + \lambda_f$ .

给定当前状态  $s \in S$ , 采取的行为  $a \in A_s$ , 直到下一次系统状态发生转移的期望时间 (即在状态  $s$  的平均逗留时间) 可以表示为

$$\begin{aligned} \tau(s, a) = & \lambda_m \cdot a_{m,1} + \lambda_{m,h} \cdot a_{m,2} + \lambda_f \cdot |a_{f,1}| + \\ & (n_f + a_f) \cdot \mu_f + (n_{m,f} - a_f) \cdot \mu_f + n_m \cdot \mu_{m,f} + \\ & n_m \cdot \mu_c + (n_f + a_f) \cdot \mu_c + (n_{m,f} - a_f) \cdot \mu_c = \\ & \lambda_m \cdot a_{m,1} + \lambda_{m,h} \cdot a_{m,2} + \lambda_f \cdot |a_{f,1}| + n_f \cdot \mu_f + \\ & n_{m,f} \cdot \mu_f + n_m \cdot \mu_m + n_m \cdot \mu_c + n_f \cdot \mu_c + n_{m,f} \cdot \mu_c \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\lambda_m \cdot a_{m,1}$  和  $\lambda_f \cdot |a_{f,1}|$  分别表示新业务到达宏基站区域和家庭基站区域的到达率;  $\lambda_{m,h} \cdot a_{m,2}$  表示业务由相邻分层网络切换到宏基站区域的到达率;  $(n_f + a_f) \cdot \mu_f$  表示接入到家庭基站的业务切换到宏基站区域速率;  $(n_{m,f} - a_f) \cdot \mu_f$  表示接入到宏基站且用户处在家庭基站区域的业务进入到宏基站区域的速率;  $n_m \cdot \mu_{m,f}$  表示接入到宏基站且用户处在宏基站区域的业务由家庭基站切换到宏基站区域的速率;  $n_m \cdot \mu_c$  表示接入到宏基站且用户处在宏基站区域的业务在宏基站区域内终止的速率;  $(n_f + a_f) \cdot \mu_c$  表示接入到家庭基站的业务在家庭基站区域内终止的速率;  $(n_{m,f} - a_f) \cdot \mu_c$  表示接入到宏基站且用户处在家庭基站区域的业务在家庭基站区域终止的速率. 从式(6)可以看出, 系统在状态  $s$  的平均逗留时间与采取的业务转移行为  $a_f$  无关.

给定系统当前状态为  $s$ , 在采取行为  $a$  的条件下, 下一个决策时刻的状态为  $s'$ . 根据泊松过程的性质, 我们有以下结论: 对于几个相互独立的泊松过程事件, 某个事件发生的概率等于该事件的发生速率与总的事件发生速率的比值. 所以系统的状态转移概率为

$$p(s, a, s') =$$

$$\begin{cases} \lambda_f \cdot \varphi(-a_{f,1}) \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (1, 0, 0) \\ (1 - a_f) \cdot [n_f \cdot \mu_f \cdot (1 - a_{m,3}) + n_f \cdot \mu_c] \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (-1, 0, 0) \\ (\lambda_m \cdot a_{m,1} + \lambda_{m,h} \cdot a_{m,2}) \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, 1, 0) \\ [n_m \cdot \mu_c + (1 - p) \cdot n_m \cdot \mu_m] \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, -1, 0) \\ \lambda_f \cdot \varphi(a_{f,1}) \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, 0, 1) \\ \{n_{m,f} \cdot \mu_c + a_f \cdot [n_f \cdot \mu_f \cdot (1 - a_{m,3}) + n_f \cdot \mu_c]\} \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, 0, -1) \\ p \cdot n_m \cdot \mu_m \cdot a_{f,2} \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (1, -1, 0) \\ (n_{m,f} \cdot \mu_f + a_f \cdot n_f \cdot \mu_f \cdot a_{m,3}) \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, 1, -1) \\ (1 - a_f) \cdot n_f \cdot \mu_f \cdot a_{m,3} \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (-1, 1, 0) \\ p \cdot n_m \cdot \mu_m \cdot (1 - a_{f,2}) \cdot \tau(s, a), & \text{if } s' = s + (0, -1, 1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\varphi(t)$  是阶跃函数, 即  $\varphi(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$ .

## 2.5 效用函数

近几年来, 无线通信网络的能耗问题引起了学术界以及产业界的共同关注. 由于基站的功耗占整个移动通信系统功耗的大部分, 人们重点关注基站节能的研究. 绿色通信不是简单地减小能耗, 而是提高网络能效. 传统基站在低负荷时的能效非常低, 因为即使业务量很小甚至没有任何业务量, 基站为了提供必要的覆盖都必须处于工作状态, 同时为了其覆盖范围内随时有可能发生的用户接入请求, 还必须维持一整套控制信号的发送和接收设备运转, 如导频、小区识别信号等. 而这些控制信道是与业务信号进行一体化设计, 在实现中也是与业务信号一起发送的, 这样当该基站的实际业务量很低甚至没有的时候, 消耗的能量与其提供的服务相比就太浪费了. 为此, 可以考虑将轻负载且高能耗基站中的业务转移到其他小区中, 提高能效<sup>[11]</sup>.

研究表明, 基站服务的业务数量越多, 它的能耗

越大,并且当所有的带宽资源均得到利用时的效用是最大的.为了简化,假设基站的功耗与业务量近似呈线性关系<sup>[12]</sup>.当基站没有业务量时,可以进入休眠状态,设此时的效用为 0;当基站处于激活状态但却没有业务量时,宏基站与家庭基站的功率分别为  $\omega_m$  和  $\omega_f$ ,宏基站与家庭基站每增加 1 个业务,相应的基站功率增加量为  $\Delta\omega_m$  和  $\Delta\omega_f$ <sup>[13]</sup>.定义  $r(s, a)$  表示系统在状态  $s$ ,采取行为  $a$  时的基站能效,则能量效用函数表示为

$$r(s, a) = \frac{n_m + n_{m,f} + n_f}{\omega_m + (n_m + n_{m,f}) \cdot \Delta\omega_m + \omega_f + n_f \cdot \Delta\omega_f} \quad (8)$$

### 2.6 最优策略

对于新到达业务,若接入请求被网络拒绝,则将发生业务阻塞,用户只能放弃或者选择重新发起接入请求;对于切换业务,若切换请求被网络拒绝,则将产生掉话,严重影响了服务质量.阻塞率和掉话率是描述无线通信网络系统性能的两个重要参数,它们的大小与网络的业务负载、信号强度、阴影以及干扰等因素有关.由于新业务和切换业务同时竞争无线资源,因此,阻塞率和掉话率不可能同时减小,但

是对用户来说,掉话比阻塞更难以被容忍.所以我们在最大化网络能效的同时,需要保持网络的低阻塞率,并且要将掉话率设定在一个更低的水平,以此来保证网络的总体性能.

设  $U$  表示接纳策略集合,定义如下:

$$U = \{u: S \rightarrow A \mid u(s) \in A, \forall s \in S\} \quad (9)$$

给定任意  $u \in U$ ,接纳控制行为  $a(t) = u(s(t))$ .

设能量效用  $r: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$  一致有界,对于任意的  $u \in U$  以及  $s_0 \in S$ ,考虑了能量效用的平均效用准则定义如下<sup>[10]</sup>:

$$J_u(s_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T r(s(t), a(t)) dt \right\} \quad (10)$$

式中,  $T$  表示总的决策时刻数,  $s(t)$  和  $a(t)$  分别表示在决策时刻  $t$  的系统状态和采取的行为.目标是对所有的  $s_0 \in S$ ,找到最优策略  $u^* \in U$  满足

$$J_{u^*}(s_0) = \max_{u \in U} J_u(s_0) \quad (11)$$

上述优化问题(11)有多种解法,其中采用有约束的线性规划问题来求解比较简单<sup>[14]</sup>.

因此,我们可以将分层网络的业务接纳控制和转移问题描述为一个线性规划问题,将阻塞率和掉话率作为约束条件,即

$$\text{Maximize } \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} r(s, a) \tau(s, a) \pi_{sa} \quad (12)$$

$$\text{Subject to } \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} \tau(s, a) \pi_{sa} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{a \in A} \pi_{s'a} = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} p(s, a, s') \pi_{sa}, \quad s' \in S \quad (14)$$

$$\pi_{sa} \geq 0, \quad s' \in S, a \in A_s \quad (15)$$

$$\frac{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} \tau(s, a) \pi_{sa} [(1 - a_{m,1}) \cdot \lambda_m + (1 - |a_{f,1}|) \cdot \lambda_f]}{\lambda_m + \lambda_f} \leq \gamma_{\text{block}} \quad (16)$$

$$\frac{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} \tau(s, a) \pi_{sa} \{(1 - a_{m,2}) \cdot \lambda_{m,h} + (1 - a_{m,3}) \cdot n_f \cdot \mu_f\}}{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} \tau(s, a) \pi_{sa} (\lambda_{m,h} + n_f \cdot \mu_f)} \leq \gamma_{\text{drop}} \quad (17)$$

式中,  $\pi_{sa}$  是决策变量.式(12)~(15)是原优化问题(11)转化成的线性规划问题;从式(13)可以看出,  $\tau(s, a) \pi_{sa}$  表示系统处于状态  $s$  并且采取接纳行为  $a$  的稳态概率,它们的和为 1;式(14)表示决策变量之间的转移关系;  $\gamma_{\text{block}}$  和  $\gamma_{\text{drop}}$  分别为设定的分层网络业务阻塞率和掉话率的上界,式(16)是分层网络新业务的阻塞率约束条件,式(17)是分层网络切换业

务的掉话率约束条件,它包括了宏基站与家庭基站之间的切换业务以及相邻分层网络切换到宏基站的业务.求解该线性规划问题即可得到最优的业务接纳控制和转移策略.由于不等式约束的存在,最优的业务接纳和转移策略不再是确定性的,而是一个平稳随机策略.我们按如下方法构建最优的业务接纳和转移策略  $u^*$ ;对于得到的最优解  $\pi_{sa}^*$ ,给定  $s \in S$ ,

对  $a \in A_s$ , 如果  $\sum_{a \in A_s} \pi_{sa}^* = 0$ , 则任意选择  $a \in A_s$ , 设  $u^*(s) = a$ ; 如果  $\sum_{a \in A_s} \pi_{sa}^* > 0$ , 则最优的接纳和转移策略依概率分布  $\pi_{sa}^* / \sum_{a \in A_s} \pi_{sa}^*$  来选择.

### 3 仿真结果

#### 3.1 仿真设置

无线分层网络仿真场景如图 1 所示, 在宏基站覆盖范围内有一个家庭基站小区. 对于新到达业务和由相邻分层网络切换到达的业务, 设它们的到达率相等, 且总业务到达家庭基站区域的比例为  $k$ , 即  $\lambda_m = \lambda_{m,h} = (1-k) \cdot \lambda/2, \lambda_f = k \cdot \lambda$ . 数据统计表明, 大部分的数据业务发生在室内的家庭基站覆盖范围内, 因此仿真时将  $k$  值设置的较大. 虽然家庭基站的覆盖范围远小于宏基站, 但用户在家庭基站区域的移动性比在宏基站区域要低, 所以将用户在家庭基站内的平均逗留时间设定的只比在宏基站略小. 阻塞率和掉话率的设定值都很小, 且保证了在不等式约束条件下, 线性规划问题有最优解. 由于仿真时对宏基站和家庭基站的带宽资源设定了较小值, 所以相应的功耗参数的选取根据文献[13]做了比例调整. 模型的仿真基于如表 1 所示的参数进行.

表 1 仿真参数  
Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$\mu_m$	1/2 min	$\mu_c$	1/1.5 min
$\mu_f$	1/1.5 min	$N_m$	6
$N_f$	2	$p$	1/5
$\gamma_{drop}$	0.03	$\gamma_{block}$	0.05
$\tau_{off}$	5 W	$\Delta \tau_{off}$	0.5 W
$\tau_{on}$	100 W	$\Delta \tau_{on}$	5 W

根据上述线性规划问题可以得到基站的平均资源利用率为

$$\bar{r}_u = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} r_u(s, a) \tau(s, a) \pi_{sa} \quad (18)$$

式中,  $r_u(s, a)$  表示系统处在状态  $s$  且采取行为  $a$  时基站的资源利用率. 家庭基站和宏基站的资源利用率表达式分别为  $r_{u,f}(s, a) = n_f / N_f, r_{u,m}(s, a) = (n_m + n_{m,f}) / N_f$ . 将求解线性规划问题得到的最优策略带入式(18)即可得到最优策略下基站的平均资源利用率.

#### 3.2 结果分析

为了评估基于马尔可夫决策过程的最优接纳控制和业务转移算法的性能, 我们将它与传统的基于马尔可夫决策过程的接纳控制算法<sup>[9]</sup>进行比较, 同时也给出了不支持宏基站切换到家庭基站的接纳控制方案的结果, 这 3 种机制均有相同的阻塞率和掉话率约束条件. 仿真结果中对系统平均效用值做了归一化处理.

图 2 给出了在不同  $k$  情况下, 分层网络最优业务接纳和转移算法的平均效用随业务到达率变化的曲线图. 可以看到, 网络的平均效用随着业务到达率的增大而变大, 因为业务到达率越大时, 有限的网络资源无法满足所有业务的需求, 出现了业务争夺资源的情况, 此时基站带宽资源得到更充分的利用, 平均能效越高; 与此同时, 随着  $k$  的增加, 网络的平均效用得到改善, 这是因为更多的业务被接纳到了效用更大的家庭基站小区中, 而宏基站小区也为切换业务提供了良好的服务.

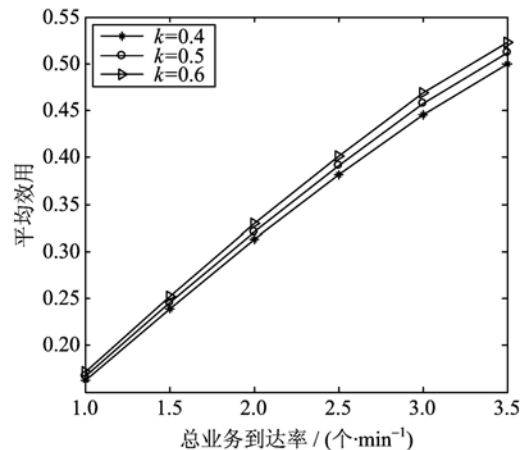


图 2 平均效用与业务到达率的关系

Fig. 2 Average reward vs  $\lambda$

图 3 给出了在  $k=0.6$  的情况下, 3 种机制的平均效用随业务到达率变化的曲线图. 可见 3 种机制的平均效用非常接近, 最优业务接纳和转移算法的平均效用最大, 基于马尔可夫决策过程的接纳算法略大于不支持宏基站切换到家庭基站的接纳控制方案.

图 4 给出了在  $k=0.6$  的情况下, 3 种机制的家庭基站和宏基站资源利用率随业务到达率变化的曲线图. 可见最优业务接纳和转移算法的家庭基站资源利用率相比另外两种接纳控制算法有明显的提升, 不支持宏基站切换到家庭基站的接纳控制方案

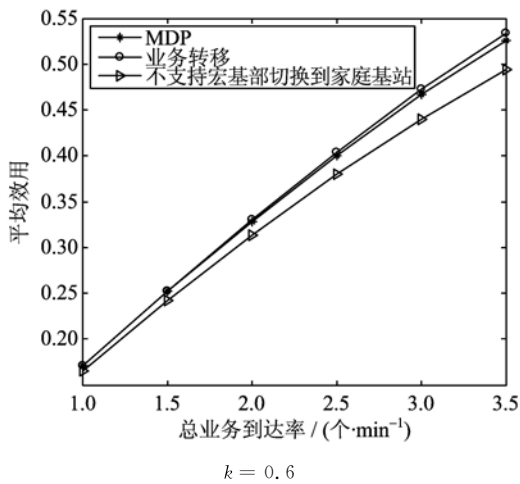


图 3 3 种机制的平均效用比较

Fig. 3 Average reward comparison under different  $\lambda$

的家庭基站资源利用率最低,而最优业务接纳和转移算法的宏基站资源利用率最小,因为更多的业务接入到了功耗低的家庭基站,这也解释了图 3 的结果;宏基站的资源利用降低也使它可以为更大的空间覆盖范围内的用户提供服务。

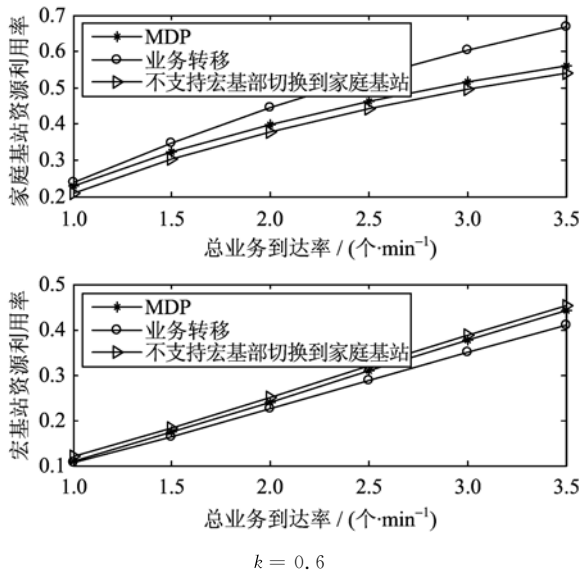


图 4 3 种机制的基站利用率比较

Fig. 4 Femtocell utilization comparison under different  $\lambda$

同时,在总业务到达率较大的时候,3 种算法的平均效用和基站资源利用率均不是很高,这是因为阻塞率和掉话率约束条件要求基站必须留有空闲带宽资源满足新业务和切换业务的接入请求。

图 5 给出了在  $k=0.6$  的情况下,3 种机制的分层网络业务阻塞率和掉话率随业务到达率变化的曲线图。可见在均满足阻塞率和掉话率约束条件的基

础上,最优业务接纳和转移算法的阻塞率和掉话率最小,不支持宏基站切换到家庭基站的接纳控制方案的阻塞率和掉话率最大。

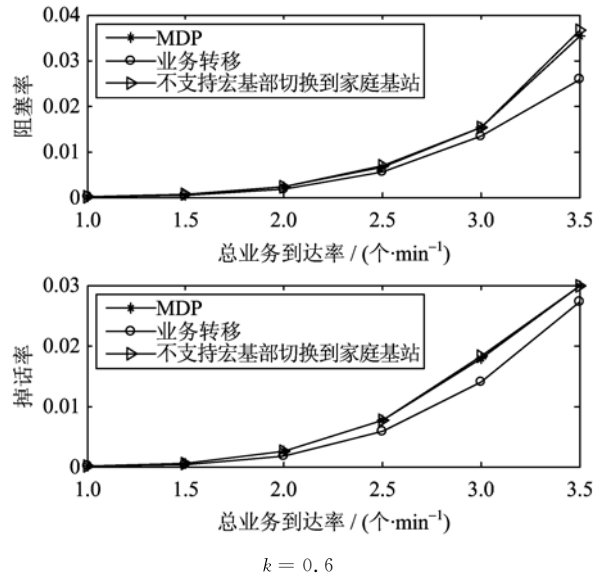


图 5 3 种机制的业务阻塞率和掉话率比较

Fig. 5 Blocking probability and dropping probability comparison under different  $\lambda$

结果表明,在获得最大平均效用的情况下,最优业务接纳控制和转移算法有效提高了能耗低的家庭基站的资源利用率,并且有更低的业务阻塞率和掉话率,改善了网络性能。

此外,由于线性规划问题的复杂度是线性的,与原有的接纳控制方案相比,增加了转移行为。但转移行为只在家庭基站有业务离开出现空闲资源,并且家庭基站区域内有连接到宏基站的业务时才进行,可见决策变量个数没有成倍增加,相应的计算量也没有明显的增加。

## 4 结论

本文研究了分层网络中的业务接纳控制和转移算法,在传统的业务接纳方法基础上,考虑采取业务转移行为,以分层网络能效为优化目标,分析了系统在不同状态下的能量效用函数以及系统状态之间的转移概率,利用马尔可夫决策过程模型推导形成了带约束条件的线性规划方程,求解得到了最优的业务接纳和转移策略。仿真结果表明,最优业务接纳和转移算法在获得最大平均效用的情况下,有效提高了家庭基站的资源利用率,并且有更低的业务阻塞率和掉话率。



## 参考文献(References)

- [ 1 ] Saunders S, Carlaw S, Giustina A, et al. Femtocells: Opportunities and Challenges for Business and Technology[M]. New York: John Wiley, 2009.
- [ 2 ] Chen Y, Zhang S Q, Xu S G, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 30-37.
- [ 3 ] Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies (EARTH)[EB/OL]. <https://www.ict-earth.eu/>.
- [ 4 ] Fehske A, Fettweis G, Malmudin J, et al. The global carbon footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(8): 55-62.
- [ 5 ] Auer G, Giannini V, Dessel C, et al. How much energy is needed to run a wireless network? [ J ]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 40-49.
- [ 6 ] Nasser N, Hassanein H S. An optimal and fair call admission control policy for seamless handoff in multimedia wireless networks with QoS guarantees [ C ]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, Dallas, USA; IEEE Press, 2004: 3 926-3 930.
- [ 7 ] Chen Y H, Chang C J, Huang C Y. Fuzzy Q-learning admission control for WCDMA/WLAN heterogeneous networks with multimedia traffic [ J ]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8 ( 11 ): 1 469-1 479.
- [ 8 ] Le L B, Dinh H T, Niyato D, et al. Joint load balancing and admission control in OFDMA-Based femtocell networks [ C ]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops. Ottawa, Canada; IEEE Press, 2012: 5 135-5 139.
- [ 9 ] Chen H, Cheng C C, Yeh H H. Guard-channel-based incremental and dynamic optimization on call admission control for next-generation QoS-aware heterogeneous systems [ J ]. IEEE Transactions On Vehicular Technology, 2008, 57(5): 3 064-3 082.
- [ 10 ] Puterman M L. Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming [ M ]. New York: John Wiley, 1994.
- [ 11 ] Miao G W, Himayat N, Li Y, et al. Cross-layer optimization for energy-efficient wireless communications: A survey [ J ]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2009, 9 ( 4 ): 529-542.
- [ 12 ] Niu Z S. TANGO: Traffic-aware network planning and green operation [ J ]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 25-29.
- [ 13 ] EARTH ( Energy Aware Radio and NeTwork tecHnologies). D2.3: Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown [ EB/OL ]. [http://ec.europa.eu/information\\_society/apps/projects/logos/3/247733/080/deliverables/001\\_EARTHWP2D23v2.pdf](http://ec.europa.eu/information_society/apps/projects/logos/3/247733/080/deliverables/001_EARTHWP2D23v2.pdf).
- [ 14 ] Tijms H C. Stochastic Modeling and Analysis: A Computational Approach [ M ]. New York: Wiley, 1986.