

# 一种支持宽带无线多媒体网络 QoS 的动态呼叫接纳策略<sup>\*</sup>

刘 干<sup>1,2</sup> 朱光喜<sup>1</sup> 吴伟民<sup>1</sup> 胡臻平<sup>1</sup> 刘应状<sup>1</sup>

(华中科技大学电子与信息工程系 宽带无线通信与多媒体技术研究中心/

武汉光电国家实验室 武汉430074)<sup>1</sup>

(湖北大学物理学与电子技术学院电子与信息工程系 武汉430062)<sup>2</sup>

**摘 要** 在无线网络中,小区微型化的趋势使得呼叫切换发生的频率越来越高,迫切需要一种有效的呼叫接纳控制策略,对有限的无线带宽资源进行分配,以保证切换时的 QoS,同时使带宽利用率最高。传统的预留带宽策略(GC, guard channel scheme)由于其固有的静态特征而不能适应流量模式的变化。最近,人们发现采用动态的随机控制策略能适应流量模式的变化,而且能使精度和稳定性大大提高。但将这种策略应用于多业务环境依然十分困难<sup>[9]</sup>,挑战来自于多类呼叫的 QoS 要求、流量模式、切换率的多样性和宽带条件下的实时可计算性。在文[3]中,我们建立了一个随机控制模型,可以在宽带条件下实时地进行多业务接纳控制,但由于没有考虑复杂的边界条件,控制精度受到影响。本文,我们在考虑边界条件的情况下,求解该随机问题,并采用一种有效的数值方法,使计算复杂度大大降低,保证了计算的实时性。最后得到的多业务动态接纳控制策略具有较高的控制精度和良好的可计算性。仿真结果显示该策略能稳定地满足多业务 QoS 对呼叫中断概率的严格限制,同时又能保证信道的高利用率。

**关键词** 呼叫接纳控制,随机控制策略,多业务 QoS 保证,宽带无线多媒体网络

## Dynamic Call Admission Policy for Broadband Wireless Multimedia Networks

LIU Gan<sup>1,2</sup> ZHU Guang-Xi<sup>1</sup> WU Wei-Min<sup>1</sup> HU Zhen-Ping<sup>1</sup> LIU Ying-Zhuang<sup>1</sup>

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074)<sup>1</sup>

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062)<sup>2</sup>

**Abstract** In wireless networks, bandwidth is extremely valuable resource. Therefore, an effective call admission control is urgent for bandwidth allocation with the occurrence of handoff increasing. The traditional guard channel scheme (GC) and its numerous variants cannot adapt to changes in traffic pattern due to their static nature. Recently, the dynamic method using stochastic control is found to be preferred. But the dynamic control for multi-services is still a problem. The main challenges with multiple types of traffic are that each has its own requirements' bandwidth, QoS guarantee, traffic characteristics and handoff rate. Moreover, the computational complexity is another challenge. In[3], we have set up a novel fictitious stochastic model to get dynamic call admission control. But this model has not considered the complex boundary conditions, so the control precision is not satisfied. In this paper, we consider the boundary conditions and its computation complexity for precision and real time control. As a result, we get an effective multi-services dynamic call admission scheme to adapt for multiple types of services in broadband wireless networks. Numerical results of simulation show that our scheme steadily satisfies the hard constraint on call dropping probability of multi-services while maintaining a high channel throughput.

**Keywords** Call admission control, Stochastic control, QoS guarantee, Broadband wireless multimedia networks

## 1 引言

支持新一代无线网络多媒体业务 QoS 的关键技术之一是接纳控制策略。而新一代无线多媒体网络的小区微型化趋势,不同种类和不同用户呼叫 QoS 需求的多样化以及多变的流量负载都要求能适应变化流量模式的、更精确的、动态的接纳控制策略<sup>[2,7~9]</sup>。

当一个活跃的移动站越过小区边界时,有可能因为在新的小区得不到带宽而发生呼叫切换中断(call handoff dropping)。从用户的角度看,这比新呼叫被阻塞更加不能令人忍

受。因此,接纳控制的主要目标是使呼叫中断概率 CDP(call dropping probability)尽可能地减小。然而,这常以阻塞新呼叫,降低带宽的利用率为代价。所以要在两者之间进行权衡。即在保证 CDP 小于给定 QoS 界条件下,使对新呼叫的阻塞概率 CBP(call blocking probability)最小。

目前一个基本的呼叫接纳策略是信道保护策略 GC(guard channel scheme)<sup>[4~6]</sup>。它们在流量模式稳定的情况下,能达到比较好的性能指标,然而,由于其静态特征而不能适应流量模式的变化。最近,人们为此而付出了很多努力,但效果并不理想,其中, S. Wu 等人提出的 SDCA 使用随机控制的

<sup>\*</sup>资助项目:国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论技术研究”(No. 603905405);国家863计划课题“新一代蜂窝移动通信系统无线传输链路技术研究”(No. 2001AA123014)。刘 干 博士研究生,讲师,研究兴趣为宽带无线通信与多媒体系统。朱光喜 教授,博士生导师,研究兴趣为宽带无线通信与多媒体系统。吴伟民 讲师,博士研究生,研究兴趣为宽带无线通信与多媒体系统。胡臻平 博士研究生,研究兴趣为宽带无线通信与多媒体系统。刘应状 副教授,博士,研究兴趣为宽带无线通信与多媒体系统。

方法<sup>[9]</sup>,大大提高了控制精度和稳定性,而且能适应流量模式的变化。但令人遗憾的是,它只能用于单业务。在文[3]中,我们建立了一个随机控制模型,可以在宽带条件下实时地进行多业务接纳控制,但由于没有考虑复杂的边界条件,控制精度受到影响。本文,我们再考虑该随机问题的边界条件,并采用一种有效的数值方法,使计算复杂度大大降低,保证了计算的实时性。最后得到一种有效的多业务动态接纳控制策略。在控制精度和可计算性方面具有独特的优势。

## 2 多业务随机模型

本文考虑多类业务,做以下几点假定:

1. 均匀分布的蜂窝无线网络中,所有的小区有相同的信道容量,信道数为  $N$ ;
2. 呼叫业务共有  $n$  类;
3. 在某一小区  $i$  中,各类业务的新呼叫到达服从泊松分布,平均到达速率为  $\lambda_i^{(m)}$ ,  $m=1,2,\dots,n$ ;
4. 各种业务的呼叫持续时间服从指数分布,平均呼叫持续时间为  $1/\mu^{(m)}$ ,  $m=1,2,\dots,n$ ,即平均呼叫结束速率为  $\mu^{(m)}$ ;
5. 信道占有时间服从指数分布,  $h_i^{(m)}$ ,  $m=1,2,\dots,n$  为各种业务从小区  $k$  到相邻小区  $i$  的速率;
6.  $c^{(m)}$ ,  $m=1,2,\dots,n$  为业务对带宽的需求,即,每个呼叫需要的信道数;
7. 保证多业务 QoS 的呼叫中断概率 CDP 极限值预先给定,记为  $P_{\text{CDP}}^{(m)}$ , ( $m=1,2$ );
8. 一个呼叫在控制周期开始时刻 ( $t=0$ ) 在  $k$  小区,而在  $t$  时刻在  $i$  小区的转移概率为  $f_{ik}^{(m)}(t)$ ,  $m=1,2,\dots,n$ ;
9. 接收概率向量  $(a_i^{(1)}, a_i^{(2)}, \dots, a_i^{(n)})$  是新呼叫被接收的概率向量。

其中,假设5被文[4]证明是有条件成立的,本文采用控制周期比呼叫在小区中逗留时间短的周期性控制,使得这个近似不影响控制算法的精度。相邻或相近的小区 BSS 之间周期性地交换信道占用情况和新呼叫到达速率等状态信息。每个小区决定在一个控制周期中:本小区各类新呼叫被接纳的概率,使得在保证各种业务的 QoS 的前提下,信道的利用率最高。也就是在各业务的 CDP 小于  $P_{\text{CDP}}^{(m)}$  的条件下,  $\sum_{m=1}^n a_i^{(m)} * c^{(m)}$  的值最大。

### 2.1 单类业务的转移概率

对某一类呼叫业务  $m$  来说,先考虑该类业务的转移概率。对一个有效的控制方法,可以假定所有的呼叫切换成功,从而对  $m$  类型的业务,由柯尔莫哥洛夫方程有:

$$\begin{cases} \frac{df_{ik}^{(m)}(t)}{dt} = - \sum_j J_{ij}^{(m)} f_{jk}^{(m)}(t) \\ f_{ij}^{(m)}(0) = \delta_{ik} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $m=1,2,\dots,n$  而  $J_{ij}^{(m)}$  是转移矩阵,

其元素由下面两式决定:

$$J_{ii}^{(m)} = h_i^{(m)} + \mu^{(m)}, J_{ik}^{(m)} = -h_{ik}^{(m)} \text{ 当 } i \neq k$$

(1)的解为:

$$f_{ik}^{(m)}(t) = [\exp(-J^{(m)}t)]_{ik} \quad (2)$$

矩阵元素可由下式获得:  $[\exp(-J^{(m)}t)]_{ik} = \sum_j U_{ij}^{(m)} e^{-\lambda_j t} U_{kj}^{-1}$  其中,  $\lambda_j$  是  $J^{(m)}$  的特征值,  $U_{ij}^{(m)}$  是相应特征向量的第  $i$  个元素。

通过转移概率,可以求出在某一时刻  $t$ ,某一小区中正在进行的各种业务呼叫数的概率分布,假定在  $k$  小区,最初有  $n_{k0}^{(m)}$  个呼叫。因为所有的呼叫到达、切换和结束等事件都是随机的,所以在  $i$  小区的  $t$  时刻,正在进行的业务呼叫数为高斯分布。

$$\text{均值为 } \sum_k f_{ik}^{(m)}(t) n_{k0}^{(m)} \quad (3)$$

$$\text{方差为 } \sum_k f_{ik}^{(m)}(t) [1 - f_{ik}^{(m)}(t)] n_{k0}^{(m)} \quad (4)$$

在  $t'$  时刻,小区  $k$  的新到达呼叫,在  $t$  时刻到达小区  $i$  的概率为  $f_{ik}^{(m)}(t-t')$ 。因为是均匀到达的,所以,在  $t$  时刻,小区  $i$ ,新呼叫数服从泊松分布,均值为:  $\sum_k g_{ik}^{(m)}(t) a_k^{(m)} \lambda_k^{(m)}$ , 其中,  $g_{ik}^{(m)}(t)$  转移概率的积分:

$$g_{ik}^{(m)}(t) = \int_0^t f_{ik}^{(m)}(t-t') dt' \quad (5)$$

而由式(2)可求  $f_{ik}^{(m)}(t)$ , 故可得  $g_{ik}^{(m)}(t)$ 。则在  $t$  时刻,在小区  $i$  中,业务类型  $m$  的呼叫数  $p_{n_i}^{(m)}(t)$  的均值为:

$$\langle n_i^{(m)}(t) \rangle = \sum_k f_{ik}^{(m)}(t) n_{k0}^{(m)} + \sum_k g_{ik}^{(m)}(t) a_k^{(m)} \lambda_k^{(m)} \quad (6)$$

$P_{n_i}^{(m)}(t)$  的方差为:

$$\sigma_i^{(m)}(t)^2 = \sum_k f_{ik}^{(m)}(t) [1 - f_{ik}^{(m)}(t)] n_{k0}^{(m)} + \sum_k g_{ik}^{(m)}(t) a_k^{(m)} \lambda_k^{(m)} \quad (7)$$

对  $m$  类业务,式(6)和(7)包含了:在一个控制周期中,从其它小区  $k$  切换到小区  $i$  的呼叫数  $f_{ik}^{(m)}(t) n_{k0}^{(m)}$  ( $i \neq k$ ), 在小区  $i$  中逗留的呼叫数  $f_{ii}^{(m)}(t) n_{i0}^{(m)}$ , 被小区  $k$  接纳的新呼叫切换到小区  $i$  的呼叫数  $g_{ik}^{(m)}(t) a_k^{(m)} \lambda_k^{(m)}$  ( $i \neq k$ ), 被小区  $i$  接纳的新呼叫数  $g_{ii}^{(m)}(t) a_i^{(m)} \lambda_i^{(m)}$ 。

在实际中,由于在一个短的控制周期中,长距离的呼叫切换的可能性很小,因此可以忽略相隔三个小区以上的切换,从而计算量可减少。

如果小区容量理想大的话,  $m$  类业务呼叫的信道占有量应服从高斯分布,均值为  $\langle n_i^{(m)}(t) \rangle$ , 方差为  $\sigma_i^{(m)}(t)^2$ ; 然而,小区容量是有限的,从而总的信道占有量并不服从高斯分布<sup>[9]</sup>, 特别对即将达到小区信道容量的极限时,尤其如此。而这正是估计呼叫中断概率 CDP 的最感兴趣的地方。

现假定在小区中,  $\Lambda_i^{(m)}$  和  $M_i^{(m)}$  为  $m$  类呼叫到达和离开的速率,其对  $n$  和  $t$  的依赖关系忽略不计,有:

$$\begin{cases} \Lambda_i^{(m)} - M_i^{(m)} = \frac{\langle n_i^{(m)}(t) \rangle - n_{i0}^{(m)}}{t} \\ \Lambda_i^{(m)} + M_i^{(m)} = \frac{\sigma_i^{(m)}(t)^2}{t} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.2 总的信道占有和释放在过程

现在,考虑小区  $i$  中总的信道占有概率  $P_n(t)$ , 面临的主要困难是如何描述总的信道占有和释放在过程,因为对于信道要求不同的多业务来说,该过程的状态转移不是一步状态转移。为此,借助于一个伪随机模型来研究实际系统。

首先,考虑总的信道占有过程,该过程不是一个简单的 Poisson 过程,而是由多类呼叫 Poisson 过程的合成,对  $m$  类呼叫来说,新接纳的呼叫和切换进入的呼叫占有信道资源的速率为  $\Lambda_i^{(m)}$ , 每个呼叫的信道占有量为  $c^{(m)}$ 。通过一个整形器可以将它构造成一个以  $\Lambda_i^{(m)} c^{(m)}$  为速率的典型的 Poisson 过程<sup>[8]</sup>, 但与文[8]不同的是,为了与多步状态转移为一步状态相吻合,如图1所示,将“到来”的大呼叫(若  $c^{(m)} > 1$ , 我们就把它叫做大呼叫,“到来”包括新接纳的和切换进入的呼叫。下面“离开”包括在结束的和切换离开的呼叫)需占用的信道以指数分布提前散布于伪随机模型时间轴上,因为信道占有过程多步状态转移为一步状态时信道必然提前被占用。总的信道占有过程就是若干个 Poisson 过程的叠加,成为一个典型的 Poisson 过程,到达速率为:

$$\Lambda = \Lambda_i = \sum_m \Lambda_i^{(m)} c^{(m)} \quad (9)$$



们有初始条件:

$$\overline{p_{n_0,n}}(0) = \delta_{n_0,n} \quad (18)$$

$$\text{令 } p = \begin{bmatrix} \overline{p_{n_0,0}} \\ \overline{p_{n_0,1}} \\ \vdots \\ \overline{p_{n_0,N}} \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix}, \delta = \begin{bmatrix} \delta_{n_0,0} \\ \delta_{n_0,1} \\ \vdots \\ \delta_{n_0,N} \end{bmatrix}$$

则式(17)可以表示为:

$$\begin{cases} p' = f(t, p) (0 \leq t \leq T) \\ p(0) = \delta \end{cases} \quad (19)$$

$$(19) \text{ 的解为: } \begin{cases} p^{(i+1)} = p^{(i)} + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = f(t^{(i)}, p^{(i)}) \\ k_2 = f(t^{(i)} + \frac{h}{2}, p^{(i)} + \frac{h}{2} k_1) \\ k_3 = f(t^{(i)} + \frac{h}{2}, p^{(i)} + \frac{h}{2} k_2) \\ k_4 = f(t^{(i)} + h, p^{(i)} + h k_3) \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $i$  迭代次数,  $t^{(i)} = ih, (i = 0, 1, \dots, S), h = \frac{T}{S}$  是区段  $[0, T]$  中的步长,  $S$  是预定的整数用于控制精度。

对  $m$  类呼叫, 呼叫中断概率  $D_i^{(m)}(t)$  由下式得到:

$$D_i^{(m)}(t) = \sum_{\xi=0}^{c_i^{(m)}-1} P_{N-\xi}(t) \approx \sum_{\xi=0}^{c_i^{(m)}-1} \overline{P_{N-\xi}(t)} \quad (21)$$

其中,  $\sum_{\xi=0}^{c_i^{(m)}-1} P_{N-\xi}(t)$  就是当  $m$  类呼叫切换进入小区  $i$  时的呼叫中断概率, 而在控制周期  $T$  内的平均呼叫中断概率为:

$$\overline{D}_i^{(m)} = \frac{1}{T} \int_0^T D_i^{(m)}(t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{\xi=0}^{c_i^{(m)}-1} \overline{P_{N-\xi}(t)} dt \quad (22)$$

利用数值积分七点 Simpson 公式可得到足够的精度。

注意, 在(22)式中只有接收概率  $a_i^{(m)}$  是未知数, 因而, 求向量  $(a_i^{(1)}, a_i^{(2)}, \dots, a_i^{(n)})$ , 使得在满足下面条件(23)式情况下 (即 QoS 要求的 CDP 条件), 能使  $\sum_{m=1}^n a_i^{(m)} c_i^{(m)}$  最大——尽量提高带宽利用率:

$$\overline{D}_i^{(m)} \leq P_{QoS}^{(m)} \text{ 和 } 0 \leq a_i^{(m)} \leq 1 (m = 1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

图4示意了在三维空间中求解的情况。

假定  $n=3, c^{(1)}=1, c^{(2)}=2, c^{(3)}=3$ , 且假定(23)式的解为图中标记为  $S$  的空间区域。则所求得的接纳概率向量  $(a_i^{(1)}, a_i^{(2)}, a_i^{(3)})$  为两图中使  $\sum_{m=1}^n a_i^{(m)} c_i^{(m)}$  最大的  $P$  点的坐标。

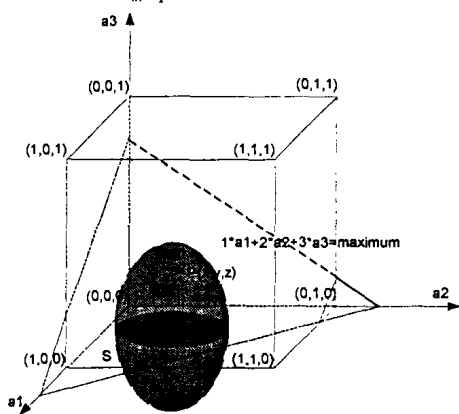


图4 三维空间求解接纳概率向量的示意

### 3 仿真结果与分析

仿真环境: 19个小区的六边形蜂窝集束, 在集束的三对边

用周期性的连接来减弱小区数有限性的影响, 三类业务, 小区交换的信息包括各呼叫信道占有数  $n_0^{(m)} (m=1, 2, 3)$  和在上一控制周期对新呼叫的接纳数  $a_i^{(m)}$ , 平均新呼叫到达速率可用滑动系数  $\alpha$  来调节:

$$\alpha a_i^{(m)}/T + (1-\alpha) a_i^{(m)} \lambda_i^{(m)} \rightarrow a_i^{(m)} \lambda_i^{(m)}$$

转移概率在本地计算(交换信息的小区间隔控制在3个以内)。  $N=150, T=20s$ , 这些参数将用来计算小区中的接纳率。其余参数如表1所示。窄带呼叫有较严格的 QoS 要求, 三类呼叫有不同的移动特征。

表1 三类呼叫的参数

Call Parameters	Type1 (m=1)	Type2 (m=2)	Type3 (m=3)
$c_i^{(m)}$	1	2	3
$h^{(m)}$	0.012( $s^{-1}$ )	0.013( $s^{-1}$ )	0.011( $s^{-1}$ )
$\mu^{(m)}$	0.005( $s^{-1}$ )	0.0035( $s^{-1}$ )	0.002( $s^{-1}$ )
$P_{QoS}^{(m)}$	0.01	0.015	0.02

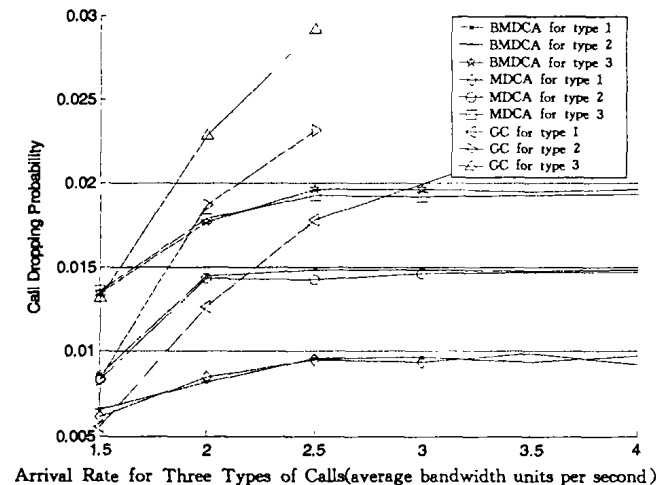


图5 三类呼叫中断概率比较

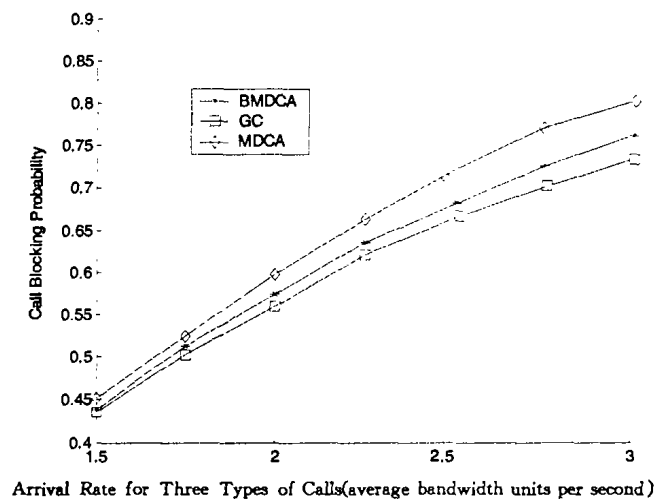


图6 呼叫阻塞概率的比较

对本文提出的考虑边界的动态呼叫接纳策略 BMDCA 与传统的 GC 策略、MDCA 策略<sup>[3]</sup>的呼叫中断概率 CDP 和呼叫阻塞概率 CBP 进行了比较, 如图5、6、7。将 GC 的保护信道数取为10, 因为在此参数下, 流量负载不高时, CDP 和 CBP 相当。当网络负载变高时, GC 的 CDP 也变高, 以至于超过了保证 QoS 的界限, 而 BMDCA 和 MDCA 策略却能将 CDP 保持

在给定的保证 QoS 的界限以下,图6显示 BMDCA 的 CBP 比 GC 高,而比 MDCA 低。图7显示 GC 的信道利用率最高,而它不能保证 QoS。BMDCA 的信道利用率比 MDCA 高,说明控制精度有提高。

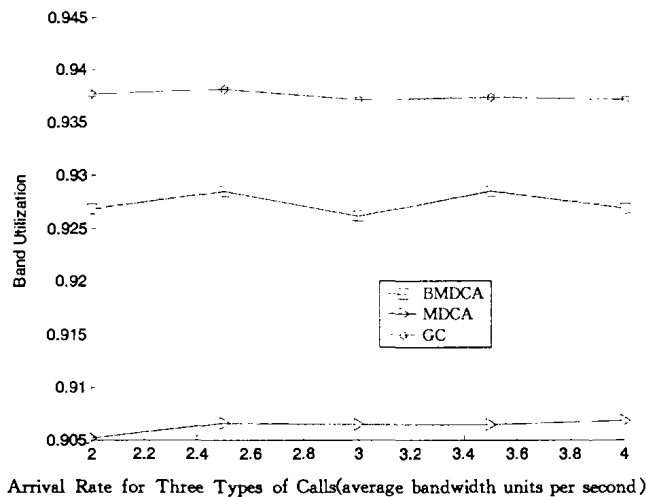


图7 总的带宽利用率的比较

**结论** 本文给出了一种有效的多业务动态呼叫接纳控制策略,用以支持无线多媒体呼叫切换的 QoS。在保证 CDP 小于 QoS 界的前提下,使无线网络的信道利用率尽可能高。该策略具有如下独特的优点:1)能为多业务提供精确的服务保证和服务区分;2)由于其动态特征,能动态地适应系统参数和流量的变化;3)由于模型考虑了带宽的限制、呼叫中断概率(call dropping probability)的时变特征,以及相邻或相近小区的影响,因而大大地提高了控制的精度;4)由于其随机动态特征,使控制更有效和稳定。仿真显示我们的策略稳定地满足多业务 QoS 对呼叫中断概率的严格限制,同时又保证了信道的高吞吐量。

我们正在使用广义生灭过程模型对 MBCA 进行扩展,以适应未来的多业务呼叫对信道占有率的更大差异,从而进一步提高控制精度和无线资源的利用率。

## 参考文献

- Rappaport T S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996
- Acampora A, Naghshineh M. Control and quality-of-service provisioning in high speed micro-cellular networks. *IEEE Pers. Commun*, 2nd quarter, 1994, 1: 36~43
- Liu G, Zhu G, Wu W, Hu Z, Liu Y. An Effective Call Admission Policy for Multi-Services Wireless Networks Using Stochastic Control. In: *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, 2004
- Fang M, Chlamtac I, Lin Y.-B. Channel occupancy times and handoff rate for mobile computing and PCS networks. *IEEE Trans. Comput.*, 1998, 47: 679~692
- Oliveira C, Kim J B, Suda T. An adaptive bandwidth reservation scheme for high-speed multimedia wireless networks. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Aug. 1998, 16: 858~874
- Posner E, Guerin R. Traffic policies in cellular radio that minimize blocking of handoff calls. In: *Proc. ITC-11, Kyoto*, 1985. 294~298
- Li B, Lin C, Chanson S. Analysis of a hybrid cutoff priority scheme for multiple classes of traffic in multimedia wireless networks. *ACM/Baltzer J. Wireless Networks*, Aug. 1998, 4: 279~290
- Luo X, Li B, Thng I L-J, Lin Y-B, Chlamtac I. An Adaptive Measured-Based Preassignment Scheme With Connection-Level QoS Support for Mobile Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* July 2002, 1: 512~529
- Wu S, Wong K Y M, Li B. A new, distributed dynamic call admission policy for mobile wireless networks with QoS guarantee. *IEEE/ACM Trans. Networking*, Apr. 2002. 257~271
- 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects QoS Concept. 3GPP, 3G TR 23. 907 Version 1. 2. 0, 1999
- Wang Zikun, Yang Xiangqun. *Birth and Death Processes and Markov Chains*. Berlin: Springer-Verlag, Beijing: Science Press, 1992. 220~237
- Liu G, Zhu G, Wu W, Liu Y. An Adaptive Call Admission Policy for Broadband Wireless Multimedia Networks Using Stochastic Control. In *Proc. IEEE WCNC*, 2004, 3: 1324~1329
- (上接第11页)
- Tobies S. The complexity of reasoning with cardinality restrictions and nominals in expressive description logics. *JAIR*, 2000, 12: 199~217
- Berners-Lee T. *Weaving the Web*. Harper, San Francisco, 1999
- Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. *The Semantic Web*. Scientific American, 2001, 284(5): 34~43
- Horrocks I, Patel-Schneider P F. Reducing OWL entailment to Description Logic satisfiability. *ISWC-2003*, Oct. 2003
- Horrocks I, Patel-Schneider P F. Three Theses of Representation in the Semantic Web. *WWW2003*, Budapest, Hungary. ACM 1-58113-680-3/03/0005, 2003
- Horrocks I, Patel-Schneider P F, van Harmelen F. From SHIQ and RDF to OWL: The Making of a Web Ontology Language. *Journal of Web Semantics*, 2003
- Patel-Schneider P F, Hayes P, Horrocks I. OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax. W3C Recommendation. Feb. 2004. <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-semantics-20040210/>
- Available at: [http://www.w3.org/2000/Talks/1206\\_xml2k-tbl/slide10-0.htmlwq](http://www.w3.org/2000/Talks/1206_xml2k-tbl/slide10-0.htmlwq)
- Horrocks I. Using an expressive description logic: FaCT or fiction? In: *Proc. of the 6th Int. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'98)*, 2001. 199~204
- Haarslev V, Möller R. RACER system description. In: *Proc. of the Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR'2001)*, volume 2083 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, 2001. 701~705
- Savitch W J. Relationships between nondeterministic and deterministic tape complexities. *Journal of Computer and System Sciences*, 1970, 4(2): 177~192
- Grosz B N, Horrocks I, Volz R, Decker S. Description logic programs: Combining logic programs with description logic. In: *Proc. of the Twelfth International World Wide Web Conference (WWW 2003)*, ACM, 2003. 48~57