

异构无线网络中基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制的研究

邓强¹, 陈山枝², 胡博¹, 时岩¹

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 电信科学技术研究院 无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 对异构无线网络中区分业务类型的接纳控制机制进行研究。分析了语音和数据 2 种典型业务在 CDMA 蜂窝网络和 WLAN 中的容量区域。基于马尔可夫决策过程理论, 提出异构无线网络中区分业务类型的接纳控制理论模型, 规定了不同类型业务的接纳控制行为并推导了系统状态转移概率。而且, 进一步从用户角度对不同类型业务 QoS 要求和网络状态之间关系进行分析, 提出一种基于模糊逻辑的接纳效用评估机制, 在保证各类业务接入和切换成功率的基础上, 推导出接纳效用最大的最优接纳控制策略。仿真表明, 基于模糊逻辑的接纳效用评估能够有效反映网络状态动态变化对接纳控制的影响, 最优接纳控制策略在平均接纳效用方面明显优于不考虑业务区分和用户移动性 2 种接纳控制机制, 并且能严格保证各类业务的接入和切换成功率。

关键词: 异构无线网络; 接纳控制; 业务区分; 马尔可夫决策过程

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)12-0027-10

Research of service-differentiated admission control based on Markov decision processes in heterogeneous wireless networks

DENG Qiang¹, CHEN Shan-zhi², HU Bo¹, SHI Yan¹

(1. State Key Lab of Switching and Networking Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Lab of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Service-differentiated admission control was studied in heterogeneous wireless networks. Capacity regions of voice and data services in CDMA cellular network and WLAN were derived. A theoretical model of admission control with differentiated services was proposed on basis of Markov decision processes theory, in which the admission actions were specified for each traffic service and system state transition probabilities were formulated. Furthermore, a fuzzy logic admission utility evaluation mechanism was presented based on the analysis of relationship of QoS requirements and network state, then the optimal admission control policy that maximizes overall utility with new and handoff call blocking probability constraints was formulated. The simulation results reveal that network dynamics can be captured by the proposed utility evaluation mechanism. And the average utility earned in the optimal admission control policy was significantly larger than two other schemes in which service differentiation and mobility are not considered, in addition, the new and handoff call blocking probability can be strictly constrained.

Key words: heterogeneous wireless network; admission control; service-differentiated; Markov decision processes

收稿日期: 2009-11-10; 修回日期: 2010-05-20

基金项目: 国家科技重大专项课题基金资助项目 (2009ZX003004-001, 2010ZX03005-002-02); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (2009RC0503); 中国下一代互联网 (CNGI) 课题基金资助项目 (CNGI-09-02-08); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20090005120013)

Foundation Items: Major National Science and Technology Special Project (2009ZX003004-001, 2010ZX03005-002-02); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2009RC0503); The China Next Generation Internet (CNGI) Project (CNGI-09-02-08); Doctorate Fund of the Ministry of Education Project (20090005120013)

1 引言

网络融合已经成为异构无线网络发展的必然趋势,各种异构接入网络在覆盖范围、资源管理和 服务支持等方面具有良好的互补特性。作为 2 种使用最为广泛的无线接入技术,CDMA 蜂窝网络能够在 大覆盖范围内为高速移动用户提供低速率、低时 延服务,而 WLAN 则能够在小覆盖范围内为低速 用户提供高吞吐量服务^[1]。在 CDMA 蜂窝网络或者 WLAN 中,接纳控制机制研究的主要目标是在保证 用户 QoS 的基础上提高系统容量,然而,由于这些 机制没有考虑其他网络的状况以及垂直切换问题, 因此不能直接应用于异构网络环境中。另外异构网 络接纳控制还应该对各种类型的业务要求进行分 析^[2],以便为不同类型的业务选择最合适的接入网 络以满足其 QoS 要求。因此,有效的接纳控制机制 应该周期性地监测网络状态,并结合用户不同类型 业务的 QoS 要求来做出最优的接纳控制策略,使得 网络达到最大业务流量负载的同时满足各类业务 的 QoS 要求。

本文对异构无线网络中区分业务类型的接纳 控制机制进行研究。首先分析了 CDMA 蜂窝网络 和 WLAN 中语音业务和数据业务的容量区域。然 后基于马尔可夫决策过程^[3]理论,提出异构无线网 络中区分业务类型的接纳控制模型,其中详细定义 了状态空间、决策时刻和接纳行为,并推导了系统 状态转移概率,给出了性能标准的一般化表达形 式。进一步地,从用户角度根据不同类型业务 QoS 要求及当前网络性能状态,提出一种基于模糊逻辑 的接纳效用评估机制。最后在保证各类业务接入和 切换成功率的基础上,推导出接纳效用最大的最优 接纳控制策略。仿真结果证明了基于模糊逻辑的接 纳效用评估能够有效反映网络状态变化对各类业 务接纳控制的影响,而最优接纳控制机制能够获得 最大平均接纳效用,并能严格保证各类业务的接入 和切换成功率。

2 相关工作

接纳控制作为异构网络系统资源管理的重要 部分,直接影响着整个网络资源使用的有效性和用 户的 QoS 要求。已有大量专门用于 CDMA 蜂窝网 络^[4,5]或者 WLAN^[6,7]的接纳控制机制来提高系统容 量同时保证服务质量。最近的一些研究成果开始关

注异构网络环境下的网络选择问题。在文献[8]中, 提出认知无线电问题,认知无线电技术在频谱利用 方面更具灵活性,能够实现更加均衡的系统负载。 在文献[9]中,提出一种基于效用的经济学模型来解 决异构网络中的资源分配和网络选择问题。在文献 [10]中,提出一种新的竞价算法来获取异构网络中 的无线信道。上述文献虽然考虑了异构网络环境, 但关注重点仍然是其中某一特定网络的接纳决策 问题。为充分利用 CDMA/WLAN 异构网络的互补 特性,研究人员开始在考虑整个异构网络条件的基 础上设计综合、有效的接纳控制机制。在文献[11] 中,研究了异构网络环境中 3 种基于测量的接纳控 制算法,通过比较业务需求和测量获得的系统资源 限制来决定是否接纳该业务请求。在文献[12]中, 推导了蜂窝网络和 WLAN 中语音和数据流量的接 纳区域,接纳控制策略考虑了不同网络对 QoS 不 同的支持能力,并能够实现系统总资源利用率的最大 化。

3 异构网络模型及容量区域分析

考虑实际部署中典型的 WLAN/CDMA 异构无 线网络架构(如图 1 所示)及流量模型,将 CDMA 蜂窝网络划分成 CDMA 区域和 WLAN 区域, WLAN 区域内的用户可以接入到 WLAN 和 CDMA 网络,而 CDMA 区域内的用户只能接入到 CDMA 网络。本文将重点关注目前广泛使用的 2 类典型业 务:语音业务和数据业务。为便于后续马尔可夫决 策过程的推导,假设新语音业务按照泊松到达率为 $\lambda_{c,n,v}$ 和 $\lambda_{w,n,v}$ 的速度进入到 CDMA 区域和 WLAN 区 域,新数据业务的到达率也近似为泊松过程,进入 CDMA 区域和 WLAN 区域的到达率为 $\lambda_{c,n,d}$ 和 $\lambda_{w,n,d}$ 。 考虑到用户移动性,假设 CDMA 网络中的数据业 务按照泊松到达率为 $\mu_{c,h,d}$ 的速度垂直切换到 WLAN, WLAN 中的语音业务和数据业务分别按照 泊松到达率为 $\mu_{w,h,v}$ 和 $\mu_{w,h,d}$ 的速度垂直切换到 CDMA 网络。由于 CDMA 蜂窝网络能够严格保证 语音业务的时延要求且为减小切换给语音业务带 来的性能下降,这里假设语音业务在从 CDMA 区 域移动到 WLAN 区域过程中不进行垂直切换。 CDMA 网络中语音业务和数据业务的驻留时间服 从平均值为 $1/\mu_{c,t,v}$ 和 $1/\mu_{c,t,d}$ 的指数分布, WLAN 中 语音业务和数据业务的驻留时间服从平均值为 $1/\mu_{w,t,v}$ 和 $1/\mu_{w,t,d}$ 的指数分布。

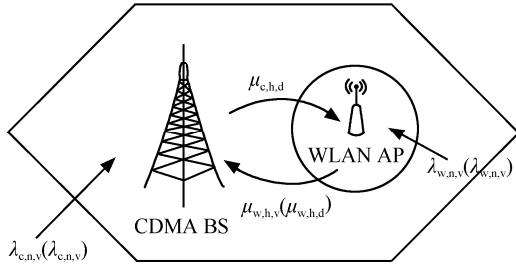


图 1 异构无线网络架构

3.1 WLAN 容量区域分析

假设 WLAN 中接纳了 n_v^w 语音业务用户和 n_d^w 数据业务用户，语音业务的平均分组速率为定值 λ_v^p ，而数据业务的分组速率与网络中的语音业务数量和数据业务数量有关，因此数据业务的分组速率可以表示为 $\lambda_d^p(n_v^w, n_d^w)$ 。在饱和状态下， $\lambda_d^p(n_v^w, n_d^w)$ 等于数据业务流分组服务率 $\xi_d^w(n_v^w, n_d^w)$ ， λ_v^p 等于语音

业务流分组服务率 $\xi_v^w(n_v^w, n_d^w)$ ；在非饱和状态下，当分组服务率大于分组速率以及分组冲突概率非常小时，将足以满足语音业务的时延要求和数据业务的吞吐量要求，即语音业务和数据业务的容量区域满足以下条件：

$$\xi_v^w(n_v^w, n_d^w) > \lambda_v^p, \quad \xi_d^w(n_v^w, n_d^w) > \lambda_d^p(n_v^w, n_d^w)$$

在某个时间片内，语音分组与数据分组/语音分组冲突的概率为

$$p_v = 1 - (1 - \rho_v^p \tau_v)^{n_v^w - 1} (1 - \rho_d^p \tau_d)^{n_d^w} \quad (1)$$

其中，

$$\rho_v^p = \frac{\lambda_v^p}{\xi_v^w(n_v^w, n_d^w)}, \quad \rho_d^p = \frac{\lambda_d^p(n_v^w, n_d^w)}{\xi_d^w(n_v^w, n_d^w)}$$

τ_v 和 τ_d 为该时间片内语音业务流和数据业务流的传输概率^[13]，可以表示为

$$\tau_v = \frac{2(1 - 2p_v)(1 - p_v^{m+1})}{W(1 - (2p_v)^{m+1})(1 - p_v) + W(1 - 2p_v)2^{m'}(p_v^{m'+1} - p_v^{m+1}) + (1 - 2p_v)(1 - p_v^{m+1})} \quad (2)$$

$$\tau_d = \frac{2(1 - 2p_d)(1 - p_d^{m+1})}{W(1 - (2p_d)^{m+1})(1 - p_d) + W(1 - 2p_d)2^{m'}(p_d^{m'+1} - p_d^{m+1}) + (1 - 2p_d)(1 - p_d^{m+1})} \quad (3)$$

其中， $W = CW_{\min} + 1$ ， CW_{\min} 表示初始退避窗口，在 IEEE 802.11 中为 31， m 表示最大重传次数， m' 表示最大退避次数。在某个时间片内数据分组冲突概率为

$$p_d = 1 - (1 - \rho_v^p \tau_v)^{n_v^w} (1 - \rho_d^p \tau_d)^{n_d^w - 1} \quad (4)$$

基于文献[14,15]分析，进一步可以得到

$$\frac{1}{\xi_v^w(n_v^w, n_d^w)} = [(n_v^w - 1)\rho_v^p + 1]T_{sv} + n_d^w \rho_d^p T_{sd} + \bar{W}_v + \frac{1}{k} [(n_v^w - 1)\rho_v^p + 1]\bar{T}_{cv} + n_d^w \rho_d^p \bar{T}_{cd} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\xi_d^w(n_v^w, n_d^w)} = [(n_d^w - 1)\rho_d^p + 1]T_{sd} + n_v^w \rho_v^p T_{sv} + \bar{W}_d + \frac{1}{k} [(n_d^w - 1)\rho_d^p + 1]\bar{T}_{cd} + n_v^w \rho_v^p \bar{T}_{cv} \quad (6)$$

其中， k 表示发生冲突的语音/数据业务流的平均数， \bar{W}_v (\bar{W}_d) 表示语音(数据)业务流的平均退避时间， \bar{T}_{cv} (\bar{T}_{cd}) 表示语音(数据)业务流帧的平均冲突时间。

基于式(1)~式(6)，可以通过递归的方法推导出语音和数据业务分组服务率 $\xi_v^w(n_v^w, n_d^w)$ 和 $\xi_d^w(n_v^w, n_d^w)$ ，以及语音和数据业务的容量区域 (n_v^w, n_d^w) 。

3.2 CDMA 蜂窝容量区域分析

假设 CDMA 蜂窝网络中有语音和数据 2 种类型的业务，语音业务通过专用信道(DCH)进行传输，而数据业务通过下行共享信道进行传输(DSCH)。Web 浏览等数据业务可能导致上行和下行链路负载不对称，这里将重点分析下行链路容量。CDMA 蜂窝网络能够接纳的业务数量受限于比特信噪比 E_b/N_0 ，网络能同时容纳的最大语音业务和数据业务数可以通过蜂窝负载因子 η_{DL} ^[16] 来计算

$$\eta_{DL} = \sum_{i=1}^{n_v^c} \frac{\rho + f_{DL}}{\frac{W_c}{(E_b/N_0)_v} \alpha_v R_{b,v}^c + \rho} + \sum_{i=1}^{n_d^c} \frac{\rho + f_{DL}}{\frac{W_c}{(E_b/N_0)_d} R_{b,d}^c + \rho} \quad (7)$$

其中， n_v^c 和 n_d^c 分别表示语音业务数和数据业务数量， ρ 表示正交因子， f_{DL} 表示蜂窝间干扰与用户接收端测量到的蜂窝内总功率的比值， W_c 表示蜂窝总带宽， $R_{b,v}^c$ 和 $R_{b,d}^c$ 分别表示语音业务和数据业务的比特速率， α_v 表示语音业务活动因子， $(E_b/N_0)_v$ 和 $(E_b/N_0)_d$ 分别表示语音业务和数据业务的比特信噪比要求。基站发射功率限制等价于蜂窝负载因子限制。

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{P_p + P_N X_n}{P_{T,\max}} \quad (8)$$

其中,

$$X_n = \sum_{i=1}^{n_v^c} \frac{L_{p,i}}{\frac{W_c}{(E_b/N_0)_v} \alpha_v R_{b,v}^c} + \rho + \sum_{i=1}^{n_d^c} \frac{L_{p,i}}{\frac{W_c}{(E_b/N_0)_d} R_{b,d}^c} + \rho \quad (9)$$

其中, $L_{p,i}$ 表示第 i 个用户的路径损耗, P_p 表示通用控制信道的功率, P_N 表示背景噪声功率, $P_{T,\max}$ 表示基站最大发射功率。通过式(7)~式(9), 可以推导出 CDMA 蜂窝网络中语音业务和数据业务的容量区域 (n_v^c, n_d^c)。

4 基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制模型

本节将异构无线网络中区分业务的接纳控制问题建模为一个马尔可夫决策过程系统模型。当不同业务类型的新用户和垂直切换用户到达时, 网络运营商根据当前各接入网的网络状态(state space)和用户的业务类型做出相应的接纳控制决策, 包括是否接纳该用户以及接纳到何种网络。在马尔可夫决策过程模型中, 这些时间点被称为决策时刻(decision epochs), 而相应的接纳控制决策被称为行为(actions)。本文的性能目标(performance criterion)是在保证各类业务接入成功率和切换成功率的前提下(constraints)下, 找出使得单位时间平均接纳效用最大的最优接纳控制策略(policy)。

4.1 状态空间

定义 1 在决策时刻 t , CDMA 蜂窝网络的状态向量可以用语音业务和数据业务的数量表示为 $\mathbf{x}_c(t) = [n_{c,v}(t), n_{c,d}(t)]$, WLAN 状态向量可以用语音业务和数据业务的数量表示为 $\mathbf{x}_w(t) = [n_{w,v}(t), n_{w,d}(t)]$, 则 CDMA/WLAN 异构网络系统的状态空间 \mathbf{X} 可以表示为

$$\mathbf{X} = \{ \mathbf{x} = [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w] = [n_{c,v}, n_{c,d}, n_{w,v}, n_{w,d}], n_{c,v} \leq n_v^c, n_{c,d} \leq n_d^c, n_{w,v} \leq n_v^w, n_{w,d} \leq n_d^w \} \quad (10)$$

其中, n_v^c, n_d^c, n_v^w 和 n_d^w 为第 1 节中推导出的 CDMA 蜂窝网络和 WLAN 语音业务和数据业务的容量区域。

4.2 决策时刻和接纳行为

每当网络中有新的或者垂直切换到该接入网

络的语音业务或者数据业务到达时, 网络运营商需要根据当前的网络状态和 \mathbf{X} 用户的业务类型做出相应的接纳控制决策, 这些时刻就是马尔可夫决策过程中的决策时刻。值得注意的是, 当有语音业务或者数据业务离开网络时, 网络状态 \mathbf{X} 同样会发生变化。因此, 将所有业务到达和离开的时刻定义为决策时刻 $t_k (k = 0, 1, 2, \dots)$, 并令 $t_0 = 0$ 。在每一个决策时刻 t_k , 网络运营商都会为在时间间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 内到达的语音业务或者数据业务做出接纳决策, 在马尔可夫决策过程中, 这些决策统称为行为。

定义 2 在决策时刻 t , CDMA/WLAN 异构网络系统中接纳控制行为可以表示为

$$\mathbf{a}(t_k) = [a_{c,n}(t_k), a_{c,h}(t_k), a_{w,n}(t_k), a_{w,h}(t_k)]$$

$a_{c,n}(t_k), a_{c,h}(t_k), a_{w,n}(t_k)$ 和 $a_{w,h}(t_k)$ 分别定义如下。

在决策时刻 t , CDMA 区域中新到达语音业务和数据业务的接纳控制行为:

$$a_{c,n}(t_k) = [a_{c,n,v}(t_k), a_{c,n,d}(t_k)] \in \{0, 1\}^2$$

如果 $a_{c,n,v}(t_k)=1 (a_{c,n,d}(t_k)=1)$, 表示在时间间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 内到达 CDMA 区域的语音业务(数据业务)将被接纳到 CDMA 网络中; 如果 $a_{c,n,v}(t_k)=0 (a_{c,n,d}(t_k)=0)$, 表示将拒绝该语音业务(数据业务)的接入请求。

在决策时刻 t , 从 WLAN 区域垂直切换到 CDMA 区域的语音业务和数据业务的接纳控制行为:

$$a_{c,h}(t_k) = [a_{c,h,v}(t_k), a_{c,h,d}(t_k)] \in \{0, 1\}^2$$

如果 $a_{c,h,v}(t_k)=1 (a_{c,h,d}(t_k)=1)$, 表示在时间间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 内垂直切换到 CDMA 区域的语音业务(数据业务)将被接纳到 CDMA 网络中; 如果 $a_{c,h,v}(t_k)=0 (a_{c,h,d}(t_k)=0)$, 表示将拒绝该语音业务(数据业务)的接入请求。

在决策时刻 t , WLAN 区域中新到达语音业务和数据业务的接纳控制行为:

$$a_{w,n}(t_k) = [a_{w,n,v}(t_k), a_{w,n,d}(t_k)] \in \{-1, 0, 1\}^2$$

如果 $a_{w,n,v}(t_k)=1$, 表示在时间间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 内到达 WLAN 区域的语音业务将被接纳到 CDMA 网络中; 如果 $a_{w,n,v}(t_k)=-1$, 表示将被接纳到 WLAN 中; 如果 $a_{w,n,v}(t_k)=0$, 表示将拒绝该语音业务的接入请求。

如果 $a_{w,n,d}(t_k)=1$, 表示在时间间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 内到达 WLAN 区域的数据业务将被接纳到 WLAN 中; 如果 $a_{w,n,d}(t_k)=-1$, 表示将被接纳到 CDMA

网络中; 如果 $a_{w,n,d}(t_k)=0$, 表示将拒绝该数据业务的接入请求。

为减小切换给语音业务带来的时延, 规定语音业务在从 CDMA 区域移动到 WLAN 区域的过程中不进行垂直切换。

在决策时刻 t , 从 CDMA 区域垂直切换到 WLAN 区域的数据业务的接纳控制行为:

$$a_{w,h}(t_k)=[a_{w,h,d}(t_k)] \in \{0,1\}$$

如果 $a_{w,h,d}(t_k)=1$, 表示在时间间隔 (t_k, t_{k+1}) 内垂直切换到 WLAN 区域的数据业务将被接纳到 WLAN 中; 如果 $a_{w,h,d}(t_k)=0$, 表示该数据业务继续停留在 CDMA 网络中。

定义 3 CDMA/WLAN 异构网络系统中语音业务和数据业务接纳控制行为空间可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A} = \{ \mathbf{a} = [& a_{c,n,v}, a_{c,n,d}, a_{c,h,v}, a_{c,h,d}, a_{w,n,v}, \\ & a_{w,n,d}, a_{w,h,d}] : a_{c,n,v} \in \{0,1\}, a_{c,n,d} \in \{0,1\}, \\ & a_{c,h,v} \in \{0,1\}, a_{c,h,d} \in \{0,1\}, a_{w,n,v} \in \{-1,0,1\}, \\ & a_{w,n,d} \in \{-1,0,1\}, a_{w,h,d} \in \{0,1\} \} \end{aligned} \quad (11)$$

对于任一给定状态 $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, 采取的接纳控制行为所产生的新状态都应该在状态空间 \mathbf{X} 中。当网络状态 $\mathbf{x} = (0,0,\dots,0)$ 时, 为保证马尔可夫决策过程能够持续进行, 规定禁止采用接纳控制行为 $\mathbf{a} = (0,0,\dots,0)$ 。

定义 4 给定状态 $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, 其接纳控制行为空间可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_x = \{ \mathbf{a} \in \mathbf{A} : & a_{c,n,v} = 0 \text{ and } a_{c,h,v} = 0 \text{ if } [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_v^u, \mathbf{x}_w] \notin \mathbf{X}, \\ & a_{c,n,d} = 0 \text{ and } a_{c,h,d} = 0 \text{ if } [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_d^u, \mathbf{x}_w] \notin \mathbf{X}, \\ & a_{w,n,v} \neq -1 \text{ and if } [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w + \mathbf{e}_v^u] \notin \mathbf{X}, \\ & a_{w,n,d} \neq 1 \text{ and } a_{w,h,d} = 0 \text{ if } [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w + \mathbf{e}_d^u] \notin \mathbf{X}, \\ & \text{and } \mathbf{a} \neq (0,0,\dots,0) \text{ if } \mathbf{x} = (0,0,\dots,0) \} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 行向量 \mathbf{e}_v^u (\mathbf{e}_d^u) 表示只有语音业务(数据业务)对应的元素值为 1, 其余为 0。 $\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_v^u$ ($\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_d^u$) 表示 CDMA 网络中语音业务(数据业务)的数量加 1, $\mathbf{x}_w + \mathbf{e}_v^u$ ($\mathbf{x}_w + \mathbf{e}_d^u$) 表示 WLAN 中语音业务(数据业务)的数量加 1。

4.3 状态转移概率

在马尔可夫决策过程中, 网络状态的动态变化可以用嵌入式马尔可夫链的状态转移概率和期望逗留时间来表示:

$$p_{xy}(\mathbf{a}) \triangleq P(\mathbf{x}(t_{k+1}) = \mathbf{y} | \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}, \mathbf{a}(t_k) = \mathbf{a}) \quad (13)$$

$$\tau_x(\mathbf{a}) \triangleq E\{t_{k+1} - t_k | \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}, \mathbf{a}(t_k) = \mathbf{a}\} \quad (14)$$

如果新到达和垂直切换语音业务和数据业务能够被接纳到 CDMA 网络和 WLAN 中, 则总业务到达率为 $\sum_v (\lambda_{c,n,v} + \mu_{w,h,v} n_{w,v} + \lambda_{w,n,v}) + \sum_d (\lambda_{c,n,d} + \mu_{w,h,d} n_{w,d} + \lambda_{w,n,d} + \mu_{c,h,d} n_{c,d})$, 总业务离开率为 $\sum_v (\mu_{c,t,v} n_{c,v} + \mu_{w,t,v} n_{w,v}) + \sum_d (\mu_{c,t,d} n_{c,d} + \mu_{w,t,d} n_{w,d})$, 总累积事件速率为总业务到达率与总业务离开率之和。

定义 5 期望逗留时间为总累积事件速率的倒数, 可以表示为

$$\begin{aligned} \tau_x(\mathbf{a}) = [& \sum_v (\lambda_{c,n,v} a_{c,n,v} + \mu_{w,h,v} n_{w,v} + \\ & \lambda_{w,n,v} | a_{w,n,v} | + \mu_{c,t,v} n_{c,v} + \mu_{w,t,v} n_{w,v}) + \\ & \sum_d (\lambda_{c,n,d} a_{c,n,d} + \mu_{w,h,d} n_{w,d} + \lambda_{w,n,d} | a_{w,n,d} | + \\ & \mu_{c,h,d} n_{c,d} a_{w,h,d} + \mu_{c,t,d} n_{c,d} + \mu_{w,t,d} n_{w,d})]^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

根据泊松过程的分解性质: 某类事件(如新语音业务到达)发生的概率等于该类事件的发生率与总累积事件发生率 $1/\tau_x(\mathbf{a})$ 的比值, 由此得到如下定义。

定义 6 CDMA/WLAN 异构网络系统的状态转移概率

$$p_{xy}(\mathbf{a}) = \begin{cases} [\lambda_{c,n,v} a_{c,n,v} + \lambda_{w,n,v} \delta(a_{w,n,v})] \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_v^u, \mathbf{x}_w] \\ \lambda_{w,n,v} \delta(-a_{w,n,v}) \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w + \mathbf{e}_v^u] \\ \mu_{w,h,v} n_{w,v} a_{c,h,v} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_v^u, \mathbf{x}_w - \mathbf{e}_d^u] \\ \mu_{c,t,v} n_{c,v} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c - \mathbf{e}_v^u, \mathbf{x}_w] \\ [\mu_{w,t,v} + \mu_{w,h,v} (1 - a_{c,h,v})] n_{w,v} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w - \mathbf{e}_v^u] \\ [\lambda_{c,n,d} a_{c,n,d} + \lambda_{w,n,d} \delta(-a_{w,n,d})] \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_d^u, \mathbf{x}_w] \\ \lambda_{w,n,d} \delta(a_{w,n,d}) \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w + \mathbf{e}_d^u] \\ \mu_{w,h,d} n_{w,d} a_{c,h,d} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c + \mathbf{e}_d^u, \mathbf{x}_w - \mathbf{e}_d^u] \\ \mu_{c,h,d} n_{c,d} a_{w,h,d} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c - \mathbf{e}_d^u, \mathbf{x}_w + \mathbf{e}_d^u] \\ \mu_{c,t,d} n_{c,d} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c - \mathbf{e}_d^u, \mathbf{x}_w] \\ [\mu_{w,t,d} + \mu_{w,h,d} (1 - a_{c,h,d})] n_{w,d} \tau_x(\mathbf{a}), & \mathbf{y} = [\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_w - \mathbf{e}_d^u] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\delta(x)$ 为符号函数, $\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$ 。

4.4 策略和性能标准

定义 7 对每一个给定状态 $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, 根据策略 $u_x \in U$ 来选择接纳控制行为 $\mathbf{a} \in \mathbf{A}_x$, 其中, U 为接纳控制策略集合, 可以表示为

$$U = \{u: X \rightarrow A \mid u_x \in A_x, \forall x \in X\} \quad (17)$$

定义 8 本文中, 选用平均效用标准作为马尔可夫决策过程的性能标准, 在下一节将对接纳效用展开详细阐述。对于任一策略 $u \in U$ 及初始状态 x_0 , 平均效用可以表示为

$$J_u(x_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T r(x(t), a(t)) dt \right\} \quad (18)$$

其中, T 表示马尔可夫决策过程从开始到结束的时间, $r(x(t), a(t))$ 表示在状态 $x(t)$ 选择行为 $a(t)$ 时在该决策时间段内所产生的期望效用。本文的目标是, 对于任意初始状态 x_0 , 找到一个最优接纳控制策略 u^* , 使得平均效用 $J_u(x_0)$ 最大。

5 基于模糊的接纳效用评估及最优接纳控制策略

不同类型业务具有不同的服务质量(QoS)要求。语音业务对于网络时延及时延抖动较为敏感, 而数据业务则更关注带宽和误码率。在异构无线网络环境下, 多样业务可以利用各接入网络的互补特性, CDMA 蜂窝网络的集中式架构能够有效为语音业务提供严格的时延保证, 而 WLAN 能够为数据业务提供较高的带宽。用户可以根据不同业务 QoS 要求和当前网络状态和性能, 对接入的满意度, 也即效用进行评估, 该效用反映了当前网络对各种业务的支持能力, 而网络运营商通过接纳控制机制使用户的平均效用值最大。本节首先将基于模糊逻辑对用户的接纳效用进行评估, 然后将其用于求解最优接纳控制策略。

5.1 基于模糊逻辑的接纳效用评估机制

评估性能指标包括当前网络时延(DL)、抖动(JT)、带宽(BW)和误码率(BER), 根据语音业务和数据业务不同的性能要求, 将评估因素集合表示为 $U = \{U_1, U_2\}$, 其中, $U_1 = \{u_{11}, u_{12}\}$ 表示时延和抖动, $U_2 = \{u_{21}, u_{22}\}$ 表示带宽和误码率。用户针对 CDMA 网络和 WLAN 的各个性能指标对接入效用进行评估, 采用模糊模型 Mamdani^[17] 并且将评估结果分为 5 个级别: 非常高(VH, very high)、高(H, high)、中等(M, medium)、低(L, low)和非常低(VL, very low), 该评估集合可以表示为 $E = \{VH, H, M, L, VL\}$ 。DL、JT、BW 和 BER 的隶属函数用三角和梯形函数表示, 如图 2 所示, 根据 3GPP TS 22.105^[3] 中对各类业务 QoS 的规定, 将各指标关键点设置如

下: $(DL_{vh}, DL_h, DL_m, DL_l, DL_{vl}) = (30ms, 100ms, 150ms, 250ms, 400ms)$, $(JT_{vh}, JT_h, JT_m, JT_l, JT_{vl}) = (1ms, 2ms, 3ms, 4ms, 5ms)$, $(BW_{vl}, BW_l, BW_m, BW_h, BW_{vh}) = (4kbit/s, 25kbit/s, 60kbit/s, 128kbit/s, 384kbit/s)$, $(BER_{vh}, BER_h, BER_m, BER_l, BER_{vl}) = (10^{-8}, 10^{-7}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3})$ 。

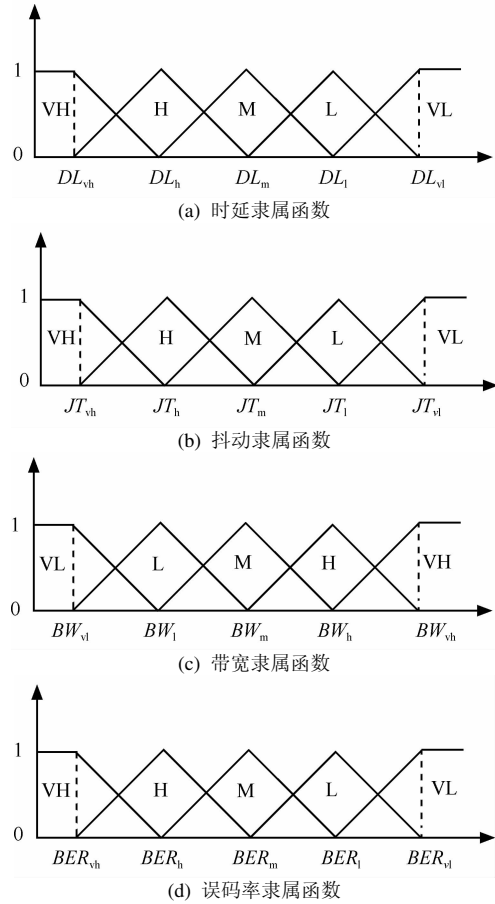


图 2 时延、抖动、带宽及误码率隶属函数

评估因素集合中共有 4 个评价接纳效用的因素。可通过这些因素构建效用评估矩阵。 U_1 的 u_{11} 和 u_{12} 与评估集合 E 可以构成一个 2×5 的矩阵 R_1 , 同理, U_2 的 u_{21} 和 u_{22} 与评估集合 E 可以构成一个 2×5 的矩阵 R_2 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} & r'_{14} & r'_{15} \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} & r'_{24} & r'_{25} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, r_{ij} 是因素 u_i 对评估集合 e_j 的隶属关系。不同业务对网络 QoS 的要求各不相同, 语音业务更关注时延和抖动, 而数据业务更注重带宽和误码率, 因

此需要对各个性能指标进行权重分配。假定权重向量 $A = (a_1, a_2)$, $A_1 = (a_{11}, a_{12})$ 和 $A_2 = (a_{21}, a_{22})$, 其中, A 表示评估因素集 U_1 和 U_2 的权重向量, A_i 是评估因素集 $U_i (i = 1, 2)$ 的权重向量。综合评估可以用式 (20) 表示:

$$B = A \circ R = (a_1, a_2) \circ \begin{bmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \end{bmatrix} \\ = (a_1, a_2) \circ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (20)$$

其中, 算子 “ \circ ” 是 $M(\bullet, \oplus)$, “ \bullet ” 表示 $a \bullet b = a \times b = ab$ 且 “ \oplus ” 表示 $a \oplus b = \min(a + b, 1)$ 。因此, B 可以表示为

$$B = \left[\frac{b_1}{\sum_{i=1}^5 b_i}, \dots, \frac{b_5}{\sum_{i=1}^5 b_i} \right] = (C_1, \dots, C_5) \quad (21)$$

其中, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 是 VH, H, M, L 和 VL 的得分百分比。评估向量 E 用数值向量 Y 表示为

$$Y = (5, 4, 3, 2, 1) \quad (22)$$

定义 9 基于模糊逻辑的综合评估接纳效用值可通过如下式进行计算。

$$Z = B \circ Y = 5 \times C_1 + 4 \times C_2 + 3 \times C_3 + 2 \times C_4 + 1 \times C_5 \quad (23)$$

其中, “ \circ ” 表示算子 $M(\bullet, +)$ 。

5.2 最优接纳控制策略

定义 8 给出了平均效用的形式化表达式, 这里结合式 (23) 接纳效用评估值。

定义 10 对于网络状态 x 和接纳控制行为 a , 区别业务的接纳控制效用函数可以表示为

$$r(x, a) = r_{c,n,d} a_{c,n,d} + r_{c,h,d} a_{c,h,d} + \\ r_{w,n,d} \delta(a_{w,n,d}) + r_{c,n,d} \delta(-a_{w,n,d}) + r_{w,h,d} a_{w,h,d} + \\ r_{c,n,d} (1 - a_{w,h,d}) + r_{c,n,v} a_{c,n,v} + r_{c,h,v} a_{c,h,v} + \\ r_{w,n,v} \delta(-a_{w,n,v}) + r_{c,n,v} \delta(a_{w,n,v}) \quad (24)$$

其中, $r_{c,n,v}$ ($r_{c,n,d}$) 和 $r_{c,h,v}$ ($r_{c,h,d}$) 为 CDMA 网络中接纳新到达语音业务(数据业务)和垂直切换语音业务(数据业务)的效用, $r_{w,n,v}$ ($r_{w,n,d}$) 和 $r_{w,h,d}$ 为 WLAN 中接纳新到达语音业务(数据业务)和垂直切换数据业务的效用。值得注意的是, 接纳行为和接纳效用均取决于业务类型和当前网络状态。

此外, 对网络运营商来说, 可以对不同类型业务限制不同的阻塞概率上限来优化接纳控制。例

如, 相对于新到达业务来说, 垂直切换业务受到阻塞会令用户更加难以忍受, 因此, 需要将垂直切换业务的阻塞概率限制在一个较小的范围内。本文中, 将阻塞概率作为基于马尔可夫决策过程的接纳控制的限制条件。

定义 11 对于所有网络状态 $x \in X$ 及接纳控制行为 $a \in A_x$, 最大接纳效用可表示为

$$\max_{z_{xa} \geq 0, x \in X, a \in A_x} \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} r(x, a) \tau_x(a) z_{xa} \quad (25)$$

限制条件

$$\sum_{a \in A_y} z_{ya} - \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} p_{xy}(a) z_{xa} = 0, y \in X \\ \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} z_{xa} \tau_x(a) = 1 \\ \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} (1 - a_{c,n,v(d)}(x)) z_{xa} \tau_x(a) \leq \gamma_{c,n,v(d)} \\ \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} (1 - a_{c,h,v(d)}(x)) z_{xa} \tau_x(a) \leq \gamma_{c,h,v(d)} \\ \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} (1 - |a_{w,n,v(d)}(x)|) z_{xa} \tau_x(a) \leq \gamma_{w,n,v(d)} \\ \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} (1 - a_{w,h,d}(x)) z_{xa} \tau_x(a) \leq \gamma_{w,h,d}$$

利用线性规划(linear programming)来求解上述最优接纳控制策略 u^* 。其中 z_{xa} ($x \in X$ 和 $a \in A_x$) 为决策变量, $z_{xa} \tau_x(a)$ 表示系统处于状态 x 并且选择接纳行为 a 的稳态概率。第 1 个限制条件为平衡等式, 第 2 个限制条件保证稳态概率之和为 1, 第 3 到第 6 个限制条件分别为 CDMA 蜂窝网络中新到达和垂直切换语音业务(数据业务), WLAN 中新到达语音业务(数据业务)以及垂直切换数据业务的阻塞概率限制条件。 z_{xa}^* 表示 LP 的最优解, 最优接纳控制策略 u^* 按照下述方法进行构建: 对任意 $a \in A_x$, 如果 $z_{xa}^* > 0$, 则 $u^*(x) = a$; 对所有 $a \in A_x$, 如果 $z_{xa}^* = 0$, 则选择任意一个 $a \in A_x$, 并设 $u^*(x) = a$ 。LP 的复杂性是基于决策变量个数的多项式复杂度, 通过内点算法可以在多项式时间内完成。

6 仿真模型和性能分析

6.1 仿真参数设置

仿真网络模型如图 1 所示, CDMA 蜂窝网络内有一个 WLAN AP, 考虑目前广泛使用的语音和数据 2 种典型业务。语音业务总到达率 $\lambda_{n,v} = \lambda_{c,n,v} + \lambda_{w,n,v}$, 数据业务总到达率 $\lambda_{n,d} = \lambda_{c,n,d} + \lambda_{w,n,d}$, 考虑到目前 CDMA 蜂窝网络仍以语音业务为主, WLAN 则主

要支持数据业务,假设总语音业务 70%到达 CDMA 蜂窝网络区域中,总数据业务 70%到达 WLAN 区域中。CDMA 蜂窝网络区域和 WLAN 区域中语音业务和数据业务的终止率 $\mu_{c,t}$ 和 $\mu_{w,t}$ 均为 0.005, CDMA 区域中数据业务的切换速率 $\mu_{c,h,d}=0.004$, WLAN 中语音业务和数据业务的切换速率 $\mu_{w,h,v}$ 和 $\mu_{w,h,d}$ 均为 0.000 5。仿真基于 MATLAB 和 NS-2,利用 NS-2 中的 MIH^[18]模块来获取网络性能参数并根据业务类型对接纳效用做出评估,考虑到语音和数据业务关注的性能指标不同,设置语音业务的模糊评估权重向量 $A = (0.8, 0.2)$, $A_1 = (0.6, 0.4)$, $A_2 = (0.5, 0.5)$;数据业务的模糊评估权重向量 $A = (0.2, 0.8)$, $A_1 = (0.5, 0.5)$, $A_2 = (0.7, 0.3)$ 。最优接纳控制策略通过 MATLAB 优化工具箱中的 Linprog 求解,同时比较的还有不区分业务类型的接纳控制和不支持用户移动性的接纳控制 2 种机制,在不区分业务类型的接纳控制机制中,CDMA 区域中的所有业务均接入到 CDMA 蜂窝网络,WLAN 区域中的所有业务均接入到 WLAN;不支持移动性指的是接纳控制只发生在 CDMA 蜂窝网络或者 WLAN,不支持 2 个网络之间的垂直切换。根据文中第 2 节对网络容量的分析,推导 CDMA 蜂窝网络和 WLAN 中语音业务和数据业务的容量区域,CDMA 蜂窝网络和 WLAN 的详细性能参数见表 1。其中,WLAN 性能参数参考了广泛使用的 IEEE 802.11 DCF 标准^[19]。

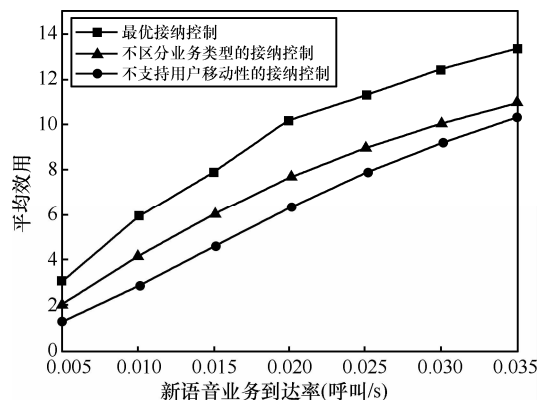
表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
$(\eta^c)^{-1}$	10 min	$(\eta^w)^{-1}$	14 min
p^{cc}	0.76	p^{cw}	0.24
W_c	3.84Mbit/s	$R_{b,v}$	12.2kbit/s
$(\mu_v)^{-1}$	140 s	f_d	64kbit/s
$Q_{vb} (Q_{dB})$	0.01	Q_{dt}	200kbit/s
m'	5	m	7
CW_{min}	7, 31	Slot	20 μ s
T_{SIFS}	10 μ s	T_{DIFS}	50 μ s
T_{RTS}	13.6slot	T_{CTS}	12.4slot
T_{ACK}	10.2 slot	$(\lambda^p)_v$	0.000 4frame/slot
Voice payload	50byte/packet	Data payload	1 000byte/packet
ρ	0.4	f_{DL}	0.55
β_v	0.43	$P_{T,max}$	43 dB
P_p	33 dB	P_N	-106dB
$(E_b/N_0)_v$	4.57 dB	$(E_b/N_0)_d$	4.96dB

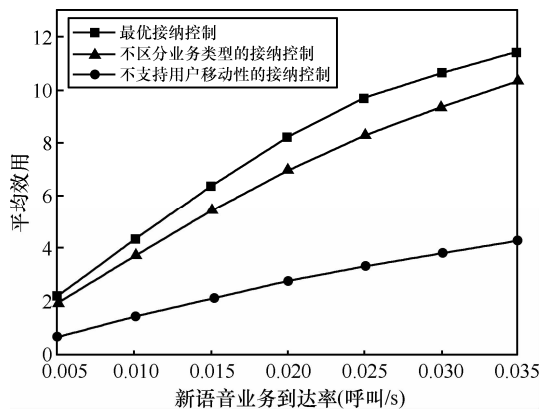
6.2 性能分析

如图 3 所示,随着语音业务和数据业务到达率由 0.005 增加到 0.035,基于马尔可夫决策过程的最优接纳控制机制获得的平均效用总是大于其他 2 种机制,不支持移动性的接纳控制机制获得的平均效

用最小。对语音业务来说,随着业务到达率的增加,WLAN 由于业务数量的增加而导致竞争加剧,无法为语音业务提供严格的时延保证,导致用户的接纳效用降低,而 CDMA 网络能够更好地满足其时延和抖动性能要求,最优接纳控制机制通过为语音用户选择 CDMA 网络而使整个网络效用值最大化,而不区分业务的接纳控制机制无法根据接纳效用为用户选择接入网络,不支持移动性的接纳控制由于掉话率增加而使接纳效用进一步降低;对数据业务来说,CDMA 蜂窝网络为每一个数据业务分配的带宽是一样的,而当 WLAN 业务数量较少时,每个数据业务能够分配到更多的带宽,从而提高用户的接纳效用,最优接纳控制机制通过将数据用户接入到 WLAN 中而使整个网络效用值最大化。



(a) 语音业务平均效用对比



(b) 数据业务平均效用对比

图 3 语音业务和数据业务平均效用对比

图 4 和图 5 显示了语音用户和数据用户的移动性给接纳效用带来的影响。由于语音业务不进行 CDMA 网络到 WLAN 的垂直切换,因此这里只考查 WLAN 中语音用户移动性,从图 4 中可以看出,随着 WLAN 中语音用户垂直切换率的增加,最优接纳

控制机制获得的接纳效用值始终明显优于其他 2 种机制。在数据业务方面，CDMA 网络与 WLAN 之间的双向切换同时存在，由于 WLAN 中用户移动速率相对较低，因此假设 $\mu_{w,h,d}=\mu_{c,h,d}/5$ ，图 5 显示随着 CDMA 网络中数据业务切换率的增加最优接纳控制机制的效用值始终最大且效用增益逐渐增加。

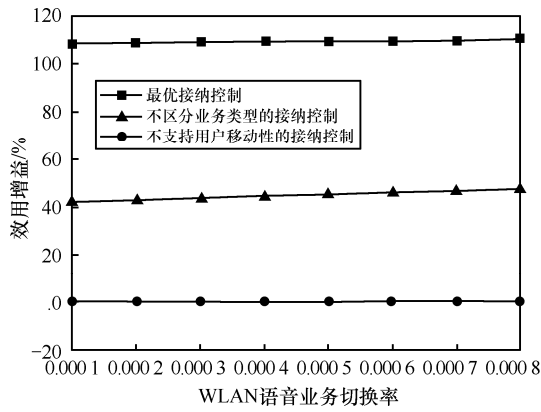


图 4 语音业务效用增益与 WLAN 中切换率的关系

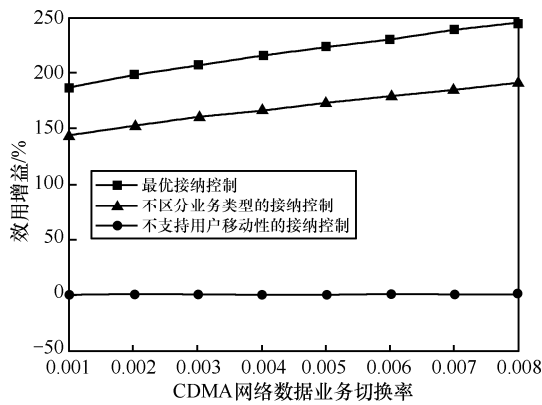
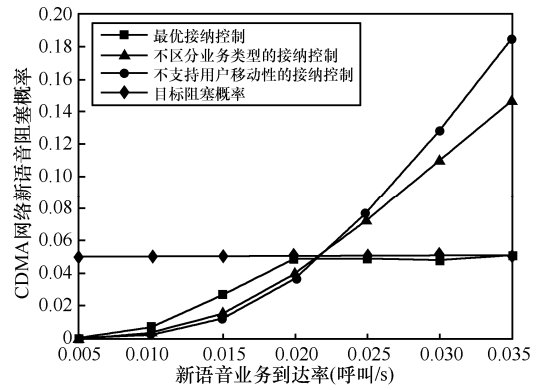
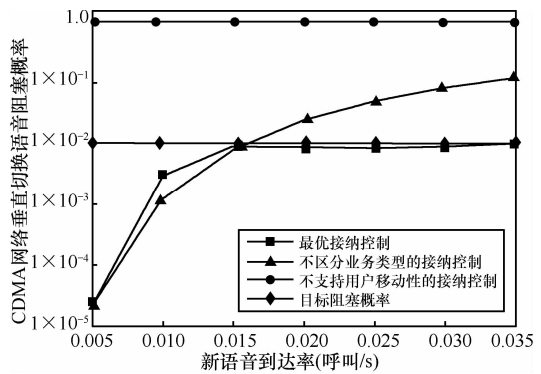


图 5 数据业务效用增益与 CDMA 中切换率的关系

最优接纳控制机制除了在接纳效用方面优于其他 2 种机制外，还能够保证语音业务和数据业务阻塞概率不超过设定目标值。如图 6(a)所示，随着语音业务到达率的增加，阻塞概率将不断增大，当业务到达率超过 0.02 时，最优接纳控制机制通过设置阻塞概率上限，可以将新到达语音业务的阻塞概率控制在 5% 以内，而其他 2 种机制的阻塞概率则呈近似线性增长趋势；图 6(b)显示的是从 WLAN 垂直切换到 CDMA 网络的语音业务的阻塞概率，不支持移动性的接纳控制的阻塞概率始终为 1，随着语音业务到达率的增加，不区分业务类型的接纳控制的阻塞概率快速增长，而最优接纳控制机制的阻塞概率可以限定在 1% 以内。在数据业务方面，如图 7(a)所示，不区分业务类型的接纳控制机制除了

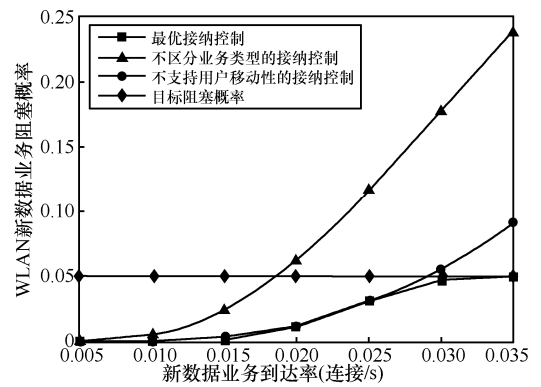


(a) CDMA 网络中新到达语音业务阻塞概率

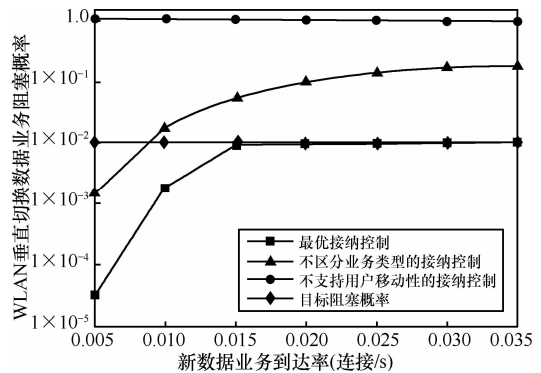


(b) CDMA 网络中垂直切换语音业务阻塞概率

图 6 CDMA 网络中新到达语音业务和垂直切换语音业务阻塞概率



(a) WLAN 中新到达数据业务的阻塞概率



(b) WLAN 中垂直切换数据业务阻塞概率

图 7 WLAN 中新到达数据业务和垂直切换数据业务阻塞概率

需要接纳新到达数据业务外, 还要接纳 CDMA 网络切换过来的数据业务, 因此阻塞概率始终高于不支持移动性的接纳控制机制, 最优接纳控制机制的阻塞概率最小且被限定在 5% 以下。如图 7(b) 所示。与语音业务类似。不支持移动性的接纳控制机制的垂直切换阻塞概率为 1, 最优接纳控制机制的垂直切换阻塞概率最小且低于 0.01。

7 结束语

本文对于异构无线网络中区分业务类型的接纳控制机制进行了研究, 基于马尔可夫决策过程理论定义了不同类型业务接纳控制行为并推导了系统状态转移概率, 分析了不同类型业务在不同网络状态条件下的接纳效用, 最终推导出使接纳效用最大的最优控制策略。基于模糊逻辑的接纳效用评估机制充分考虑了不同类型业务 QoS 要求和网络状态的动态变化。最优接纳控制机制能够在保证各类业务接入和切换成功率的基础上最大化平均接纳效用。通过验证分析表明, 基于模糊逻辑的接纳效用评估能够有效反映网络状态变化对接纳控制的影响, 而最优接纳控制机制能够获得最大平均接纳效用, 并能严格保证各类业务的接入和切换成功率。

参考文献:

- [1] BUDDHIKOT M, CHANDRANMENON G, HAN S, *et al.* Integration of 802.11 and third-generation wireless data networks[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. 2003. 503-512.
- [2] SONG W, JIANG H, ZHUANG W, *et al.* Call admission control for integrated voice/data services in cellular/WLAN interworking[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. 2006. 5480-5485.
- [3] HU Q Y, LIU J Y. An Introduction to Markov Decision Processes[M]. Xidian Press, 2000.125-158.
- [4] RAMJEE R, NAGARAJAN R, TOWSLEY D. On optimal call admission control in cellular networks[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. 1996. 43-50.
- [5] ZHANG H, FANG X M. Pricing and game theory based admission control scheme[J]. Journal on Communications, 2008,29(7):94-102.
- [6] GAO D, CAI J, NGAN K N. Admission control in IEEE 802.11e wireless LANs[J]. IEEE Network, 2005, 19(4):6-13.
- [7] CHEN M X, LIU G, ZHU G X. Utility based call admission control in WLAN[J]. ACTA Electronic Sinica, 2008, 36(7):1429-1434.
- [8] MALDONADO D, LE B, HUGINE A, *et al.* Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation: a discussion and an illustrative example[A]. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)[C]. 2005.

597-600.

- [9] CHAN H, FAN P, CAO Z. A utility-based network selection scheme for multiple services in heterogeneous networks[A]. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing[C]. 2005.1175-1180.
- [10] SURI N R, NARAHARI Y. An auction algorithm for procuring wireless channel in a heterogeneous wireless network[A]. IEEE IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks[C]. 2006. 1-5.
- [11] LAI Y C, TSAI S F. Unfairness of measurement-based admission controls in a heterogeneous environment[A]. International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)[C]. 2001. 667-674.
- [12] SONG W, ZHUANG W. QoS provisioning via admission control in cellular/wireless LAN interworking[A]. International Conference on Broadband Networks[C]. 2005. 543-550.
- [13] WU H, PENG Y, LONG K, *et al.* Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. 2002. 599-607.
- [14] TICKOO O, SIKDAR B. A queueing model for finite load IEEE 802.11 random access MAC[A]. Proc IEEE ICC[C]. 2004.175-179.
- [15] CAI L X, SHEN X, MARK J W, *et al.* Voice capacity analysis of WLAN with unbalanced traffic[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2006, 55(3):752-761.
- [16] P REZ-ROMERO J, SALLENTO O, AGUSTI R, *et al.* Radio Resource Management Strategies in UMTS[M]. New York: Wiley, 2005.
- [17] PEDRYCZ W, GOMIDE F. An Introduction to Fuzzy Sets Analysis and Design[M]. MIT Press, 1998.
- [18] IEEE 802.11 media independent handover working group[EB/OL]. <http://www.ieee802.org/21/>.
- [19] ANSI/IEEE Std 802.11. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications[S]. 1999.

作者简介:



邓强 (1982-), 男, 山东青岛人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为异构网络资源管理和移动性管理。

陈山枝 (1969-), 男, 浙江台州人, 电信科学技术研究院教授级高级工程师、博士生导师, 主要研究方向为移动性管理、自组织网络和网络生存性。

胡博 (1978-), 男, 安徽相城人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为移动互联网和移动性管理。

时岩 (1975-), 女, 河南南阳人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为异构网络和移动性管理。