

系统服务等级约束下提高认知无线网络可达业务负荷的研究

余亮, 江涛, 曹洋

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对现有方案在系统服务等级约束下可能会降低认知无线网络可达业务负荷的问题, 提出了一种新的频谱共享机制以提高系统服务等级约束下具有异构业务的认知无线网络可达业务负荷。该机制的主要思想是根据实时业务和非实时业务的不同延时特性, 分别引入剥夺优先权和缓冲队列, 进而同时减小异构次用户呼叫的强制中断概率和阻塞概率。仿真结果表明, 所提机制能有效提高系统服务等级约束下认知无线网络的可达业务负荷。

关键词: 认知无线网络; 系统服务等级; 可达业务负荷; 异构业务

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)11-0024-09

Improving achievable traffic load of cognitive wireless networks under GoS constraints

YU Liang, JIANG Tao, CAO Yang

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To improve the achievable traffic load of secondary user(SU) under grade of service (GoS) constraints in cognitive wireless networks with heterogeneous traffic, a novel spectrum sharing scheme was proposed. The key idea of the proposed scheme was to introduce preemptive priority and buffering mechanism for real-time traffic and non-real-time traffic, respectively, according to their different delay characteristics. The proposed scheme could reduce the forced termination probability and the blocking probability for heterogeneous calls simultaneously. Numerical results show that the proposed scheme can effectively improve the achievable traffic load of SUs under GoS constraints.

Key words: cognitive wireless network; GoS; achievable traffic load; heterogeneous traffic

1 引言

认知无线电 (CR, cognitive radio) 是一种很有前景的通信技术, 因为它能极大地提高频谱利用效率。CR 的主要思想是允许没有频谱许可证的次用户通过智能感知并机会式接入到主用户临时未用的频谱空洞中。在机会式频谱接入^[1]的认知无线网络中, 有 2 种情形应该避免。一方面, 当主用户呼

叫占据次用户呼叫正在使用的许可信道后, 次用户呼叫如果不能通过频谱切换找到其他空闲信道, 则该次用户呼叫将被中断。一旦次用户呼叫被中断, 一些资源 (譬如: 功率、频谱) 将会被浪费且次用户呼叫的性能会下降^[2]。另一方面, 当所有的许可信道被占据后, 新到达的次用户呼叫将被阻塞, 这意味着该呼叫的服务无法被提供。在文献[3]中, 认知无线网络中的系统服务等级 (GoS, grade of ser-

收稿日期: 2011-07-19; 修回日期: 2011-11-12

基金项目: 新一代宽带无线移动通信网国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX003004); 国家自然科学基金资助项目 (61172052)

Foundation Items: The Next Generation Broadband Wireless Mobile Telecommunications Networks National Science and Technology Major Project (2010ZX003004); The National Natural Science Foundation of China (61172052)

vice)由 2 个指标来量化：呼叫强制中断（丢弃）概率和呼叫阻塞概率。根据文献[4,5]，无线网络中比较合理的 GoS 约束如下：呼叫阻塞概率为 2%~5%，呼叫强制中断概率为 1%。当主用户业务和 GoS 约束给定后，认知无线网络的可达业务负荷将被确定^[3]。而且，提高 GoS 约束下认知无线网络的可达业务负荷可以通过在 GoS 的 2 个指标之间进行比较好的折中来实现^[3]。

在机会式频谱接入的认知无线网络研究背景下，存在一些关于 GoS 性能指标的研究^[2,6-8]。在文献[2,6,7]中，这些方案能减小强制中断概率，但会导致呼叫阻塞概率的增加。在文献[8]中，作者提出了一种具有缓冲队列的频谱共享机制，该机制能减小呼叫阻塞概率但会导致强制中断概率的增加。总之，上述方案主要是牺牲 GoS 的一个性能指标来换取另一个性能指标的提升。其次，这些方案未区分次用户业务类型。然而，在实际应用中，次用户呼叫常具有多种业务类型，譬如：语音、数据、视频等。因此，当上述方案应用于具有异构业务的认知无线网络中时，给定 GoS 约束下认知无线网络的可达业务负荷可能会降低，因为 GoS 性能指标之间比较好的折中并不是总能得到保证。

为了提高具有异构业务的认知无线网络在 GoS 约束下的可达业务负荷，本文提出了一种新的频谱共享机制去同时减小 GoS 的 2 个性能指标，而非以一个指标为代价来提升另一个指标。所提机制的核

心思想是为实时次用户呼叫和非实时次用户呼叫分别引入剥夺优先权和缓冲队列。具体来说，对于实时次用户呼叫，它们可以在无空闲信道可用且缓冲队列未满时去剥夺非实时次用户呼叫的服务，进而获得信道。对于非实时次用户呼叫，如果无空闲信道，它们将被临时保存在缓冲队列中，一旦有信道被释放，它们将从队列中弹出并接入到新被释放的信道中。仿真结果表明：所提机制能有效提高给定 GoS 约束下认知无线网络的可达业务负荷。

2 系统模型及所提机制

2.1 本文所提机制的系统模型

本文考虑的网络模型如图 1 所示，其中主用户网络包括主用户基站和主用户，基于基础设施的次用户网络由次用户基站和次用户构成。假定主用户并不知晓次用户在哪个信道上工作且有权收回任何被次用户机会式使用的许可信道。当次用户所使用的许可信道被主用户收回时，次用户呼叫可以通过频谱切换机制接入到其他可用的空闲信道^[6,8]。在网络模型中，次用户基站负责分配频谱资源，提供固定网络接入，检测空闲许可信道等。本文中，假定频谱感知过程是准确的^[6]。其次，假定次用户有 2 种呼叫类型，实时次用户呼叫和非实时次用户呼叫。为了便于分析，假定主用户呼叫、实时次用户呼叫或非实时次用户呼叫每次只占用一个信道^[9]。

本文所提的频谱共享机制系统模型如图 2 所

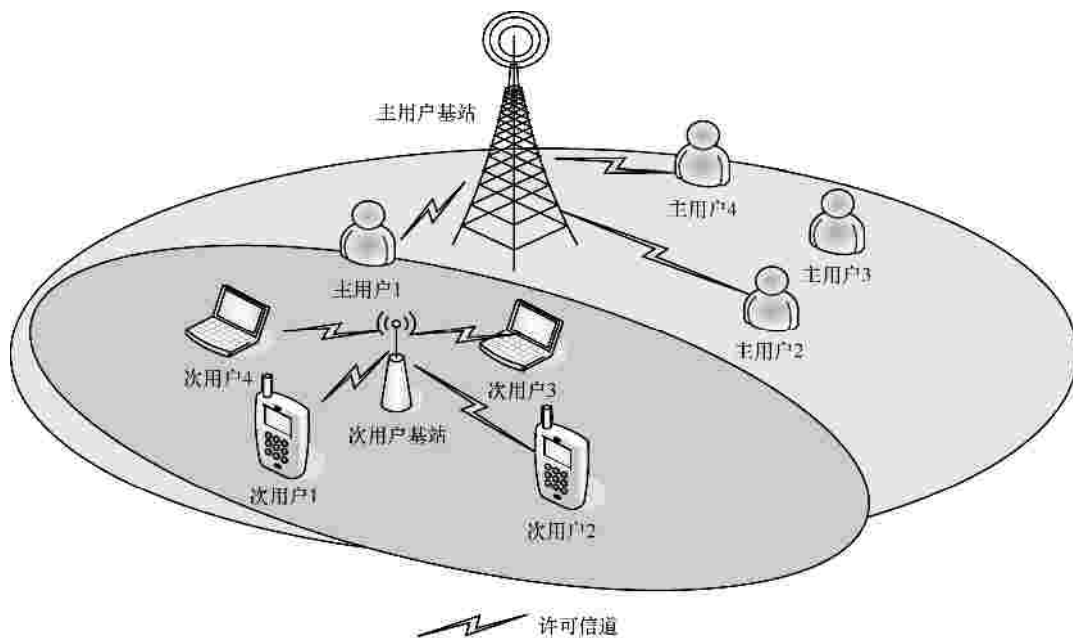


图 1 网络模型

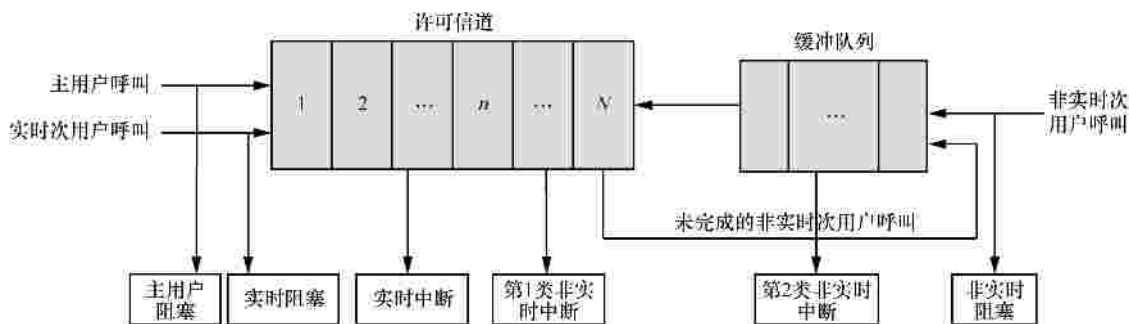


图 2 所提频谱共享机制的系统模型

示，其中实时次用户呼叫与非实时次用户呼叫相比，具有更高的优先权，即前者可以在没有信道可用且缓冲队列非满时去剥夺后者的服务，进而抢占信道。被剥夺的非实时次用户呼叫将被放入到缓冲队列^[9]中，如果非实时次用户呼叫在最大等待时间超时前还未获得信道，则被从缓冲队列中丢弃。系统的动态特性由以下 7 个事件触发，并会导致 6 个可能的频谱共享状态（如黑体字所示）。

1) 主用户呼叫到达。如果主用户呼叫到达时，所有的信道均被其他主用户呼叫占用，此时主用户呼叫将被阻塞（主用户呼叫阻塞）。否则，该主用户呼叫将随机选择一个没有被其他主用户占用的信道，这将可能导致使用该信道的次用户呼叫因为无法得到其他可用信道而发生中断。对于实时次用户呼叫来说，如果此时无可用信道且非实时次用户呼叫的服务不能被剥夺，则该实时次用户呼叫将被中断（实时呼叫中断）。对于非实时次用户呼叫来说，如果无可用信道且缓冲队列已满，此时该非实时次用户呼叫将被中断（第 1 类非实时呼叫中断）。

2) 实时次用户呼叫到达。到达的实时次用户呼叫将会随机占用一个空闲信道。如果无空闲信道，则它将剥夺非实时次用户呼叫的服务来获得信道。如果非实时次用户呼叫无法被剥夺，则实时次用户呼叫将被阻塞（实时呼叫阻塞）。

3) 非实时次用户呼叫到达。到达的非实时次用户呼叫将会随机占用一个空闲信道。如果无空闲信道，则它将被放入到缓冲队列中。如果缓冲队列已满，则该非实时次用户呼叫将被阻塞（非实时呼叫阻塞）。

4) 任何呼叫（包括主用户呼叫、实时次用户呼叫、非实时次用户呼叫）服务完成。该事件将会导致一个信道被释放。如果缓冲队列不为空的话，队列头的非实时次用户呼叫将会被删除并占据刚被

释放的信道。

5) 非实时次用户呼叫被缓冲队列丢弃。如果缓冲队列中的非实时次用户呼叫不能在最大等待时间超时前获得一个可用信道，则它将被丢弃，进而导致其中断（第 2 类非实时呼叫中断）。

2.2 与现有机制的对比

现有的机制主要为文献[6]和文献[8]中的 3 种机制，即：文献[8]中基于缓冲队列的频谱共享机制，文献[8]中仅支持频谱切换的频谱共享机制，文献[6]中基于信道预留的频谱接入机制。在后面的仿真部分，选择文献[8]中仅支持频谱切换的机制作为性能对比基线，原因是该机制为动态频谱接入系统中最常见的机制之一，即：主用户无需知晓次用户是否在某些信道上存在，当主用户呼叫占据某个次用户呼叫正在使用的信道后，次用户呼叫停止使用当前该信道并切换至其他可用的空闲信道，故该机制无需像文献[3]中的 PR-CA 机制那样修改主用户系统，利用其作为对比基线具有一定的普适意义^[7]。

图 3 给出了在异构业务下 3 种性能对比机制的原理框图。图 3(a)为基线对应的框图，该机制未考虑实时次用户呼叫与非实时次用户呼叫之间的优先关系，仅支持频谱切换机制。图 3(b)与图 3(a)类似，也未考虑实时次用户呼叫与非实时次用户呼叫的优先关系，但采用了信道预留机制。故该机制可以减小呼叫的中断概率，但同时会增加阻塞概率^[6]。图 3(c)中的机制也未考虑实时呼叫和非实时呼叫之间的优先关系，但根据非实时呼叫的特性引入了缓冲队列。故与图 3(a)中的机制相比，图 3(c)中的机制能大大地减小非实时次用户呼叫的阻塞概率^[8]，但同时会增加实时次用户呼叫的阻塞概率及中断概率，因为缓冲队列等效于增加了非实时呼叫的到达强度。本文所提机制与图 3(c)对应的机制类似，差别在于：本文所提机制考虑了实时次用户呼

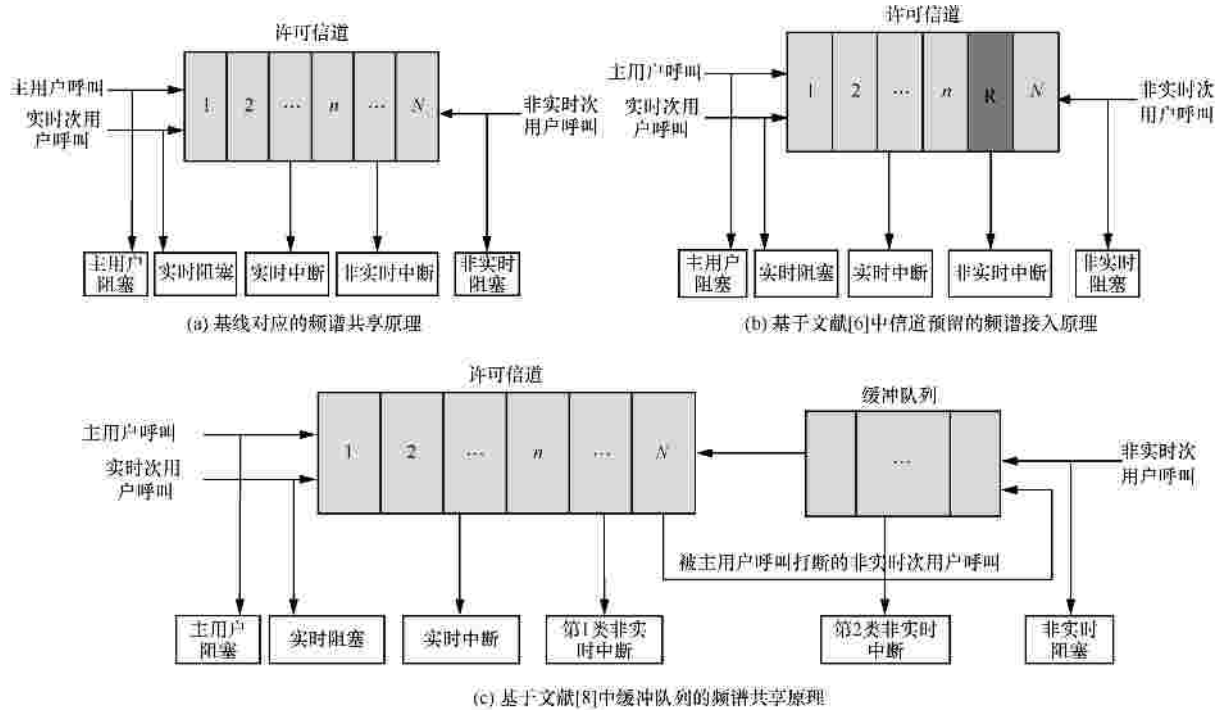


图 3 各种对比机制对应的原理

叫和非实时次用户呼叫间之间的优先关系，即：新到达的或被主用户中断的实时次用户呼叫能在缓冲队列非满的情况下剥夺非实时次用户呼叫占用的信道。故与图 3(c)中的机制相比，本文所提机制能减小实时次用户呼叫的阻塞概率及强制中断概率，但会增加非实时次用户呼叫的阻塞概率。与图 3(a)中的机制相比，本文所提机制能利用剥夺优先权来减小实时次用户呼叫的阻塞概率和中断概率，并在非实时次用户呼叫强度不太大且延时容忍程度比较高的条件下，利用缓冲队列来减小非实时次用户呼叫的阻塞概率。

3 稳态性能分析

本节基于连续时间马尔科夫链模型^[6-10]对所提机制的稳态性能进行了分析。假定主用户呼叫、实时次用户呼叫及非实时次用户呼叫的到达分别服从参数为 l_p 、 l_{rt} 及 l_{nrt} 的独立泊松过程，它们的服务时间分别服从均值为 $1/m_p$ 、 $1/m_{rt}$ 及 $1/m_{nrt}$ 的负指数分布。非实时次用户呼叫在缓冲队列中能容忍的最大等待时延服从均值为 $1/r_d$ 的负指数分布。用 (i, j, k, m) 表示系统状态，其中 i 、 j 、 k 分别表示被主用户呼叫、实时次用户呼叫及非实时次用户呼叫所占用的许可信道数目， m 表示缓冲队列中非实时认知次用户呼叫的个数。整个系统的状态空间可表示

为 $G = \{(i, j, k, m) | 0 \leq i + j + k \leq N; 0 \leq m \leq Q\}$ ，其中 N 表示所有可用许可信道的数目， Q 表示缓冲队列的长度。用 P 表示稳态概率分布矢量，其中的一个元素 $p_{i,j,k,m}$ 对应为系统状态 $(i, j, k, m) \in G$ 的稳态概率。

为了分析方便，本文将状态空间 G 分按照第 2 节的系统动态特性成了 4 个子空间，在每个子空间内，所有状态的稳态平衡方程均可由通用的等式来表达，每个子空间的系统状态转移图如图 4 所示。根据连续时间马尔科夫链的稳态平衡方程^[11]，对于状态空间内的任意一个状态 i 和 k ，有式(1)成立。即

$$p_i \sum_{k, k \neq i} l_{ik} = \sum_{k, k \neq i} p_k l_{ki} \quad (1)$$

其中 p_i 、 p_k 分别为状态 i 和状态 k 的稳态概率。 l_{ik} 表示状态 i 到状态 k 的转移速率。根据式(1)及图 4 中的状态转移，可以得出式(2)、式(3)、式(4)、式(5)的稳态平衡方程

$$\begin{aligned} & (im_p + jm_{rt} + km_{nrt} + l_{rt} + l_{nrt} + l_p)p_{i,j,k,0} \\ & = l_{nrt}p_{i,j,k-1,0} + (i+1)m_p p_{i+1,j,k,0} + l_p p_{i-1,j,k,0} + \\ & (k+1)m_{nrt}p_{i,j,k+1,0} + l_{rt}p_{i,j-1,k,0} + (j+1)m_{rt}p_{i,j+1,k,0} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & [(l_p + l_{rt})\bar{d}_k + im_p + jm_{rt} + km_{nrt} + l_{nrt}]p_{i,j,k,0} \\ & = (j+1)m_p p_{i,j+1,k-1,1} + (km_{nrt} + r_d)p_{i,j,k,1} + l_{rt}p_{i,j-1,k,0} + \\ & l_{nrt}p_{i,j,k-1,0} + l_p p_{i-1,j,k,0} + (i+1)m_p p_{i+1,j,k-1,1} \end{aligned} \quad (3)$$

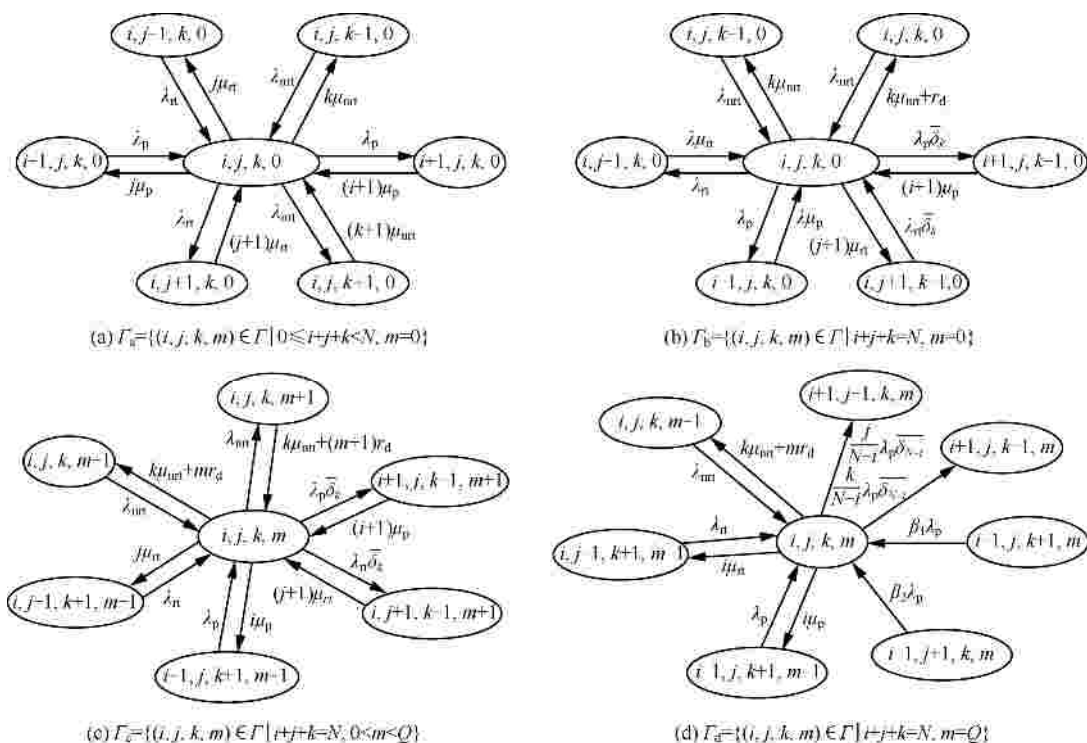


图 4 状态转移

$$\begin{aligned}
 & [(l_p + l_{rt})\bar{d}_k + im_p + jm_{rt} + km_{nt} + mr_d + l_{nt}] p_{i,j,k,m} \\
 & = l_p p_{i-1,j,k+1,m-1} + l_{rt} p_{i,j-1,k+1,m-1} + [km_{nt} + (m+1)r_d] p_{i,j,k,m+1} + \\
 & (i+1)m_p p_{i+1,j,k-1,m+1} + (j+1)m_{rt} p_{i+1,j,k-1,m+1} + l_{nr} p_{i,j,k,m-1}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & (l_p \bar{d}_{N-i} + im_p + jm_{rt} + km_{nt} + mr_d) p_{i,j,k,m} \\
 & = b_2 l_p p_{i-1,j+1,k,m} + l_{rt} p_{i,j-1,k+1,m-1} + \\
 & b_1 l_p p_{i-1,j,k+1,m} + l_p p_{i-1,j,k+1,m-1} + l_{nr} p_{i,j,k,m-1}
 \end{aligned} \tag{5}$$

在图 4(b)、图 4(c)、图 4(d)中， \bar{d}_k 表示当 k 为非零值时， \bar{d}_k 为 1。 b_1 和 b_2 分别等于 $(k+1)/(N-i+1)$ ， $(j+1)/(N-i+1)$ 。 在上述的稳态平衡方程中，如果 $(i, j, k, m) \notin G$ ，则 $p_{i,j,k,m} = 0$ 。 另外，稳态概率分布 P 应该满足下面的归一化约束^[10]

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m l_{i,j,k,m} = 1 \tag{6}$$

结合等式(2)~式(6) 利用逐次超松弛法^[11](SoR, successive over relaxation) 求解该线性方程组，最终可以得到稳态概率分布。

4 性能评价指标

基于第 3 节得到的稳态概率分布，可以计算出 GoS 的 2 个性能评价指标，即呼叫强制中断概率与呼叫阻塞概率。 然后，利用这 2 种概率得出给定

GoS 约束下认知网络总的可达业务负荷的表达式。

4.1 呼叫强制中断概率

在本文中，呼叫强制中断概率指系统中被激活的呼叫没有正常终止的概率。 因此，对于实时次用户呼叫来说，中断发生由主用户呼叫到达导致；而对于非实时呼叫来说，中断发生的原因包括：1) 主用户呼叫到达；2) 缓冲队列中的呼叫因为最大等待时延超时而被丢弃。

对于被系统接纳的实时次用户呼叫来说，它们将被主用户呼叫以一定概率打断，用 P_{i-rt} 表示实时次用户呼叫被主用户呼叫打断的概率，则在有实时次用户呼叫存在的条件下，实时次用户呼叫被打断的概率 P_{i-rt} 可以表示如下

$$P_{i-rt} = \frac{\sum_{\{(i,j,k,m) \in G | j > 0\}} \frac{j}{N-i} p_{i,j,k,m} I_1}{\sum_{\{(i,j,k,m) \in G | j > 0\}} p_{i,j,k,m}} \tag{7}$$

其中，

$$I_1 = \begin{cases} 1, & i+j+k=N, j>0, k=0 \text{ or } m=Q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{8}$$

在一个实时次用户呼叫的服务持续时间内，将有多主用户呼叫到达。 且每个主用户呼叫将以概率 P_{i-rt} 打断该实时呼叫。 因此，在整个服务时间内，

该实时呼叫将经历多次被打断的可能性。定义 P_{f-rt} 为该实时次用户呼叫强制中断概率， t_s 为该实时呼叫的服务时间， $t_{p,1}$ 表示该实时次用户呼叫服务开始至下一个主用户呼叫到达之间的时间段， $t_{p,w}$ ($w=2,3,\dots$) 表示在第一个主用户呼叫到达后，各个主用户呼叫到达时刻之间的间隔。则 $t_{p,w}$ 服从均值为 $1/\rho_p$ 的指数分布，且该实时次用户呼叫的中断概率 P_{f-rt} 为

$$P_{f-rt} = \sum_{w=1}^{\infty} P(t_s > \sum_{u=1}^w t_{p,u}) (1 - P_{i-rt})^{w-1} P_{i-rt} \quad (9)$$

其中， $\sum_{u=1}^w t_{p,u}$ 为厄兰分布，其参数为 ρ_p 和 w ，

$P(t_s > \sum_{u=1}^w t_{p,u})$ 的值最终计算如下

$$P\left(t_s > \sum_{u=1}^w t_{p,u}\right) = \left(\frac{l_p}{m_s + l_p}\right)^w \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得

$$P_{f-rt} = \frac{\frac{l_p}{m_{rt} + l_p} P_{i-rt}}{1 - \frac{l_p}{m_{rt} + l_p} (1 - P_{i-rt})} = \frac{l_p P_{i-rt}}{m_{rt} + l_p P_{i-rt}} \quad (11)$$

对于非实时次用户呼叫来说，其强制中断概率 P_{f-nrt} 由 2 部分构成：主用户呼叫到达引起的中断所对应的中断概率 P_{f-ni} 以及缓冲队列中最大等待时延超时所对应的中断概率 P_{f-nd} 。与式(7)类似，主用户呼叫到达造成的非实时呼叫被打断的概率 P_{f-ni} 可以计算为

$$P_{f-nrt} = \frac{\sum_{\{(i,j,k,m) \in G\}} \frac{k}{N-i} P_{i,j,k,m} I_2}{\sum_{\{(i,j,k,m) \in G | k > 0\}} P_{i,j,k,m}} \quad (12)$$

其中，

$$I_2 = \begin{cases} 1, & i + j + k = N, m = Q, k > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

因此，由于主用户呼叫到达造成的非实时呼叫的中断概率 P_{f-ni} 为

$$P_{f-ni} = \frac{l_p P_{i-nrt}}{m_{nrt} + l_p P_{i-nrt}} \quad (14)$$

对于缓冲队列中的非实时次用户呼叫来说，当其最大等待时间超时后将被丢弃，进而造成中断。定义 j_m 为一个时间段，其起点是某个非实时次用户呼叫进入缓冲队列，且有 $m-1$ 个呼叫正在排队，其终点是系统中任意一个呼叫完成或者缓冲队列中的某个呼叫被丢弃。因此， j_m 服从均值为 $1/(im_p + jm_n + km_{nt} + mr_d)$ 的负指数分布。令 Y ($Y = \sum_{i=1}^m j_i$) 表示非实时次用户呼叫在得到一个可用信道前需要等待的时间，令 t 表示非实时次用户呼叫在缓冲队列中能容忍的最大时间，则非实时次用户呼叫因没有得到信道而被丢弃的概率为

$$P\{t < Y\} = 1 - \int_0^{\infty} f_Y(y) e^{-r_d y} dy \quad (15)$$

其中， $f_Y(y)$ 为 Y 的概率密度函数，经计算可得

$$P\{t < Y\} = \frac{mr_d}{im_p + jm_n + km_{nt} + (m+1)r_d} \quad (16)$$

因此，因缓冲队列中最大等待时间超时导致的中断概率 P_{f-nd} 可以表示为

$$P_{f-nd} = \sum_{m=1}^Q \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} p_{i,j,k,m} P\{t < Y\} \quad (17)$$

其中， $i + j + k = N$ 。联立式(14)和式(17)可得

$$P_{f-nrt} = P_{f-ni} + P_{f-nd} \quad (18)$$

4.2 呼叫阻塞概率

实时次用户呼叫到达后，如果无可用空闲信道且非实时次用户呼叫的服务不能被其剥夺，此时实时次用户呼叫将被阻塞。当非实时次用户呼叫到达后，如果无可用空闲信道且缓冲队列已满，此时非实时认知呼叫将被阻塞。因此，实时呼叫和非实时呼叫的阻塞概率分别表示为

$$P_{b-rt} = \sum_{G_1} p_{i,j,k,m}, P_{b-nrt} = \sum_{G_2} p_{i,j,k,m} \quad (19)$$

其中， G_1 和 G_2 分别为 $\{(i,j,k,m) \in G | i + j + k = N, k = 0 \text{ or } m = Q\}$ ， $\{(i,j,k,m) \in G | i + j + k = N, m = Q\}$ 。

4.3 给定 GoS 约束下认知网络总的可达业务负荷

定义 $r = l_{rt}/m_{rt} + l_{nrt}/m_{nrt}$ 为认知网络总的业务负荷，单位为厄兰。因此，本文目标是在给定 GoS 约束条件下最大化 r 值，即

$$r^* = \max_{G_{rt}, G_{nrt}} r \Big|_{G_{rt}, G_{rt}^*, G_{nrt}, G_{nrt}^*} \quad (20)$$

称 r^* 为给定 GoS 约束下认知无线网络的可达业务负荷。 G_{rt}^* 和 G_{nrt}^* 表示实时业务和非实时业务的 GoS 约束, G_{rt} 和 G_{nrt} 分别表示实时业务和非实时业务实际的 GoS。以上所有 GoS 均由二元组表示: $GoS = \langle P_b, P_f \rangle$, 其中 P_b 和 P_f 分别表示阻塞概率和强制中断概率。

5 仿真分析

本节对所提机制进行了性能仿真分析。实验中的仿真参数设置如下: $N=8, Q=16, \lambda_p=0.01$ (呼叫/s), $\mu_p^{-1}=80$ (s/呼叫), $\lambda_{rt}=0.01$ (呼叫/s), $\mu_{rt}^{-1}=60$ (s/呼叫), $\mu_{nrt}^{-1}=10$ (s/呼叫), $r_d^{-1}=100s$ 或 $400s, R_c=1$ 。其中, R_c 为文献[6]中信道的预留个数。另外, 定义 γ 为非实时业务负荷与认知网络中总的业务负荷之比。仿真主要评估 2 个方面: 1) 给定实时次用户业务下,

评估非实时次用户业务到达率在 GoS 约束下对认知网络可达业务负荷的影响; 2) 给定非实时次用户业务下, 评估实时次用户平均服务时间在 GoS 约束下对认知网络可达业务负荷的影响。

图 5 给出了不同机制和业务类型对应的强制中断概率与阻塞概率随 γ 的变化曲线。与基线相比, 本文所提机制能分别在 γ 不大于 0.86 ($r_d=1/100$) 和不大于 0.9 ($r_d=1/400$) 时同时降低强制中断概率和阻塞概率, 而文献[6]和文献[8]中的机制仅能在 2 种概率间取得折中。因此, 本文所提机制与基线相比, 能提高给定 GoS 约束下的认知网络可达业务负荷, 而文献[6]和文献[8]中的机制可能会降低认知网络可达业务负荷, 因为较好的折中并不总能得到保证。此外, 从图 5 可以看出, 本文所提机制的性能在很大程度上取决于非实时呼叫在缓冲队列中能忍受的最大等待时延。该时延值越大, 非实时呼叫强制中断概率会越小(如图 5(b)所示), 因为未被服

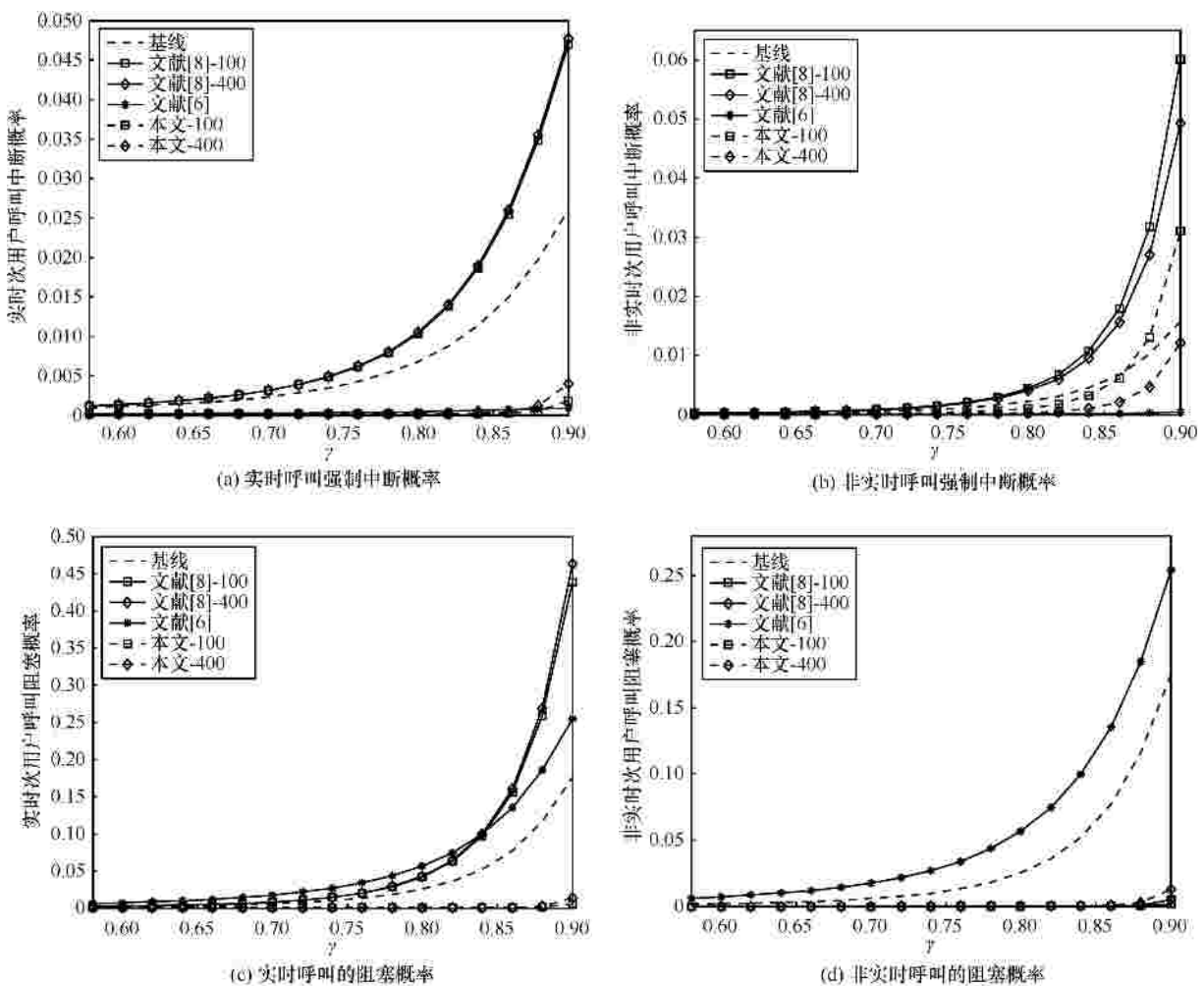


图 5 不同机制和业务类型对应的强制中断概率与阻塞概率随 γ 的变化曲线

务而离开缓冲队列的可能性会减小。但这也会导致非实时呼叫的阻塞概率增加(如图 5(d)所示),因为增加的缓冲队列平均长度会导致非实时呼叫接入到系统中的可能性减小。另外,实时呼叫的阻塞概率和中断概率会增加(如图 5(a)和图 5(c)所示),因为当实时次用户呼叫需要信道时,能在缓冲队列非满条件下剥夺非实时呼叫的可能性减小。

在给定的 GoS 约束下,图 5 对应的认知网络可达业务负荷如图 6 所示。其 GoS 约束设为^[4,5]:强制中断概率为 0.005 或者 0.01,阻塞概率为 0.05。对实时业务和非实时业务来说,设置相同。可以发现:在该 GoS 约束条件下,本文提出的机制性能最好。与基线相比,当强制中断概率约束(P_t^*)和阻塞概率约束(P_b^*)分别为 0.005 和 0.05,排队最大容忍时延为 100s 时,本文的机制可以提高性能 52.7%。当排队最大容忍时延为 400s 时,可以提高性能 88.91%。相比之下,文献[6]和文献[8]对应的机制有时候会降低可达业务负荷。

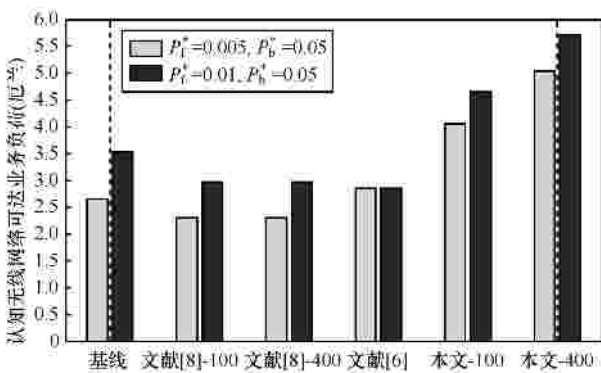


图 6 不同 GoS 约束下各种机制对应的可达业务负荷对比曲线

图 7 给出了不同 GoS 约束下,实时业务平均服务时间对认知网络可达业务负荷的影响。可以发现:1) 当实时业务的平均服务时间(μ_r^{-1})增加时,所有机制的性能均降低。因为更大的平均服务时间意味着较小的服务完成率,进而增加阻塞概率和强制中断概率,最终导致 GoS 下降;2) 当 GoS 呼叫强制中断概率约束 P_t^* 从 0.005 变为 0.01 时,文献[8]和基线对应的性能提升较大,而文献[6]对应的性能提升并不明显。其原因是文献[6]中的机制能通过信道预留来取得较小的强制中断概率;3) 本文所提机制在两种场景下的性能都最好。与基线相比,本文的机制在 $P_t^*=0.005$ 和 $P_t^*=0.01$ 时,可以分别将性能提高 38.93%和 31.26%。

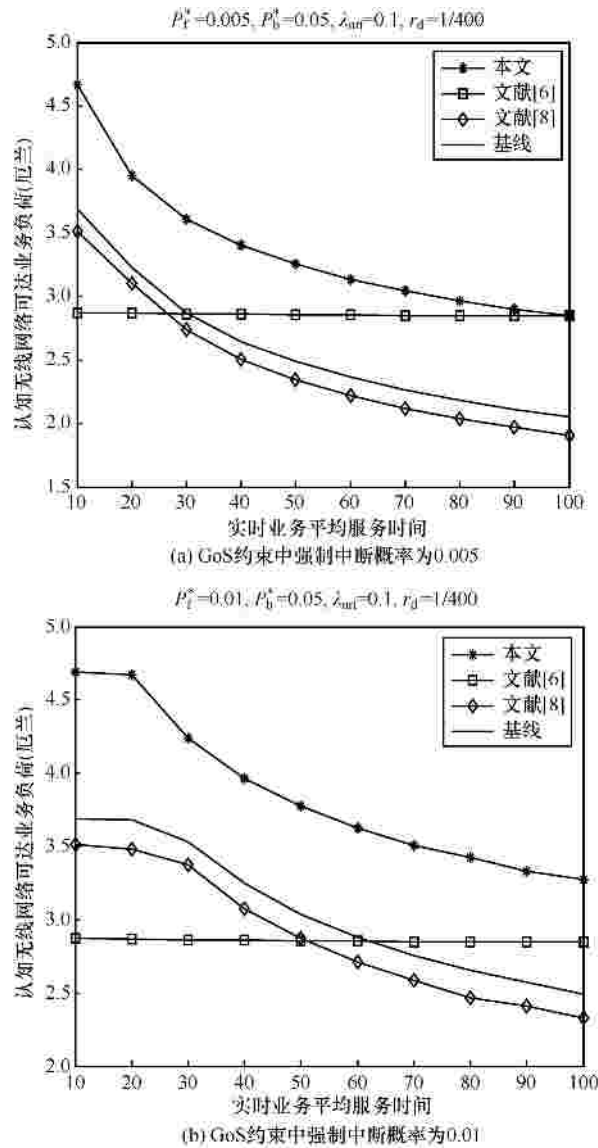


图 7 认知网络可达业务负荷随实时业务平均服务时间的变化曲线

6 结束语

本文提出了一种新的频谱共享机制以提高系统服务等级 (GoS) 约束下具有异构业务的认知无线网络可达业务负荷。该机制利用剥夺优先权和缓冲队列来同时降低实时业务和非实时业务的强制中断概率和阻塞概率。其次,本文利用多维马尔科夫链模型对所提机制的稳态性能进行了分析,并推导了强制中断概率和阻塞概率的表达式。仿真结果表明,本文提出的频谱共享机制能在一定条件下有效提高系统服务等级约束下认知无线网络的可达业务负荷。

参考文献:

[1] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive mac for

opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2007, 25(3):589-600.

[2] KANNAPPA S M, SAQUIB M. Performance analysis of a cognitive network with dynamic spectrum assignment to secondary [A]. IEEE ICC 2010[C]. Cape Town, South Africa , 2010. 1-5.

[3] TANG P K, CHEW Y H. On the modeling and performance of three opportunistic spectrum access schemes[J]. IEEE Trans Veh Tech, 2010, 59(8): 4070-4078.

[4] ESTRELLO C R, VALDEZ G H, CRUZ F A. System level analysis of mobile cellular networks considering link unreliability [J]. IEEE Trans Veh Tech, 2009, 58(2):926-940.

[5] CAPAR F, MARTOYO I, WEISS T, *et al.* Comparison of bandwidth utilization for controlled and uncontrolled channel assignment in a spectrum pooling system[A]. IEEE VTC 2002[C]. Vancouver, Canada , 2002. 1069-1073.

[6] ZHU X, SHEN L. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation[J]. IEEE Commun Lett, 2007, 11 (4): 304-306.

[7] GAO J, SURAWEERA H A, FAULKNER M. Comments on analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(9):4488-4491.

[8] ZHANG Y. Dynamic spectrum access in cognitive radio wireless networks[A]. IEEE ICC 2008[C]. Beijing, China, 2008. 4927-4932.

[9] TANG S, MARK B L. Modeling and analysis of opportunistic spectrum sharing with unreliable spectrum sensing[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8 (4):1934-1943.

[10] XING Y, CHANDDRAMOULI R, MANGOLD S, *et al.* Dynamic

spectrum access in open spectrum wireless networks[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2006, 24(3):626-636.

[11] COOPER R B. Introduction to Queuing Theory[M]. New York: North Holland, 1981.

作者简介：



余亮 (1986-)，男，湖北仙桃人，华中科技大学博士生，主要研究方向为智能电网、认知无线网络等。



江涛 (1970-)，男，安徽桐城人，华中科技大学和武汉光电国家实验室（筹）教授、博士生导师，主要研究方向为多载波通信、光无线、智能电网及通信安全等。



曹洋 (1987-)，男，湖北武汉人，华中科技大学博士生，主要研究方向为基于云计算的无线网络资源管理和认知无线电等。