

支持紧急通信的无线认知网络频谱接入方法

官铮, 钱文华, 虞美乐

(云南大学 信息学院, 云南 昆明 650091)

摘要: 提出了支持应急通信的无线认知网络机会频谱接入模型。首先按照离散时间完全和限定($k=1$)服务两级轮询策略实现主用户和次用户对频谱的共享。其次, 通过在数据确认中捎带轮询列表信息方式实现数据传输和用户调度的并行处理, 减少用户切换造成的时延浪费。通过建模分析得出网络吞吐量及用户平均等待时延的精确解析, 结果表明本方案能有效抑制次用户对主用户通信质量的影响, 又能增加网络吞吐量并为通信业务提供时延保障。

关键词: 机会频谱接入; 时延保证; 无线认知网络; 应急通信

中图分类号: TN911

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0182-07

Cognitive network spectrum access for emergency communications

GUAN Zheng, QIAN Wen-hua, YU Mei-le

(School of Information Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A wireless cognitive network opportunistic spectrum accessing scheme which provided delay guarantee for emergency communications was proposed. Primary user (PU) and secondary users (SU) shared the spectrum resources according to the discrete time two-level exhausted and limited ($k=1$) polling mechanism. Then, piggyback acknowledgement was used to realize the parallel scheduling between data transportation and users access, and then reducing the time consumption cause by the user switching. Finally, the mathematics functions was set up and achieved the closed form expressions for the mean waiting time theoretical analysis and simulation experiment. It is proved that the proposed scheme is both interference restraining and high throughput with the delay guaranteed.

Key words: opportunistic spectrum access; delay-guaranteed; wireless cognitive network; emergency communications

1 引言

物联网技术的发展加大了无线通信业务需求的快速增长, 也使得有限的频谱资源更加稀缺。传统的授权网络中, 主用户只能在授权频带上工作, 使用静态的信道接入方式来完成通信, 频谱利用率较低; 认知无线网络中, 次用户本身没有频谱授权, 而是在不干扰主用户的前提下访问网络, 即采用动态频谱接入(DSA, dynamic spectrum access)技术, 有效提高了频谱的利用率。

为获得更高的资源利用率, 针对认知网络的研

究也从最初的物理层逐步扩展到 MAC 层、路由层等多个方面^[1,2]。作为物理层与网络层的中间层, MAC 层技术的研究在频谱检测、频谱接入等方面都面临着诸多挑战。目前的 DSA 技术主要有以下 3 种模型: 交织(interweave)、衬垫(underlay)和覆盖(overlay)。与 underlay 和 overlay 模型不同, 在 interweave 模型中感知用户不能与授权用户同时共享频谱资源, 仅能寻找机会利用频谱空穴, 因此也被称为机会频谱接入(OSA, opportunistic spectrum access), 是目前 DSA 研究的热点^[3]。

最具代表性的 Zhao 等人建立了在部分可观察

收稿日期: 2012-08-27

基金项目: 云南省自然科学基金青年基金资助项目(2012FD002); 云南省教育厅基金资助项目(2011Y117)

Foundation Items: Yunnan Youth Project Foundation(2012FD002); Yunnan Provincial Department of Education Foundation(2011Y117)

马尔科夫过程(POMDP)框架下的非集中式 OSA 网络 MAC 层协议, 但存在次用户间资源共享公平性无法保障的不足^[4-6]。孙君等提出了基于距离和业务的 ad hoc 网络中的机会频谱接入框架, 次用户通过根据自身业务特性及距离因素选择最优接入信道的方法达到保证公平性和减小碰撞概率的目的^[7,8]。此外, 当次用户确定最优接入信道后, 还需从接入调度策略和信道占用方式的角度考虑信道使用公平性和有效性, 否则由于接入冲突、突发业务等因素引起的碰撞将降低网络工作效率。为此, Chen 等采用 CR-ALOHA 与 CR-CSMA 相结合的方式对次用户的随机接入调度研究^[9]。

另一方面, 大量研究主要针对通用认知网络展开, 随着认知网络在自然灾害抢险、社会稳定维护等应急通信环境中的应用, 具有通信业务低延迟和高频谱利用率保障的支持应急通信的 MAC 协议研究显得十分必要, 文献^[10]通过对用户状态及信道状态建立有限状态马尔科夫链分析用户排队队长, 未对时延特性进行分析。

本文针对有基础设施的认知网络, 提出一种支持应急通信的轮询控制机会频谱接入策略, 重点讨论目标接入信道确定后, 次用户与主用户的信道接入、占用策略。基于预约的轮询接入控制方式可有效避免碰撞。针对应急通信中时延敏感业务, 在保障主用户正常通信的前提下, 自适应调度次用户高效访问信道, 从传输时延、网络吞吐量等方面, 为次用户和主用户提供 QoS 保障; 另外, 本文利用排队论理论对用户中数据排队状态建立马尔科夫链, 采用概率母函数的分析方法获得了用户数据平均排队等待时延的精确解析。

2 时隙式轮询控制机会频谱接入

在本文所述时隙式轮询控制机会频谱接入策略中, SU 和 PU 按 interweave 模式分时占用信道, 即 SU 仅能在 PU 无数据传输时占用信道。SU 通过频谱检测信息协商后加入某一授权频段并由基站进行管理, 活动期间通过侦听主用户的信道占用情况来发现频谱空穴, 并按基站分配的逻辑顺序进行机会接入。

图 1 给出了一个无线认知网的实例。在基站接收范围内分布有主用户 PU₁ 和 PU₂ 分别工作在授权信道 1 和授权信道 2, 次用户 SU₁₁、SU₁₂ 和 SU₁₃ 按照一定规则确定可用度较高的信道 1 为目标接入

信道。在该场景中, 次用户 SU 采用何种机会接入策略与主用户动态的共享信道成为研究的重点, 文献^[11]中对并行调度完全与限定($k=1$)两级轮询接入模型与其余两级轮询控制模型^[12,13]进行比较, 证明该模型具有较好的时延保障特性, 在此, 进一步将该模型应用于描述基站对主、次用户的共享接入信道的控制策略。

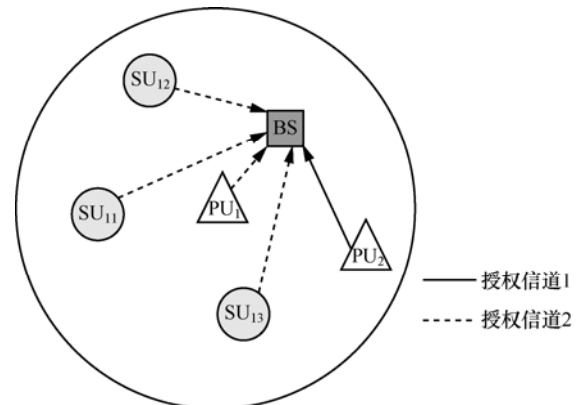


图 1 无线认知网络实例

2.1 信道占用方式

时间轴被划分为以时隙为单位, 信道的占用和释放等操作仅能在时隙起始时开始。

基站负责次用户管理, 包括次用户的加入和退出, 次用户轮询顺序列表的生成、更新和发放。

为保证主用户的信道使用权, 避免因次用户的占用造成主用户网络服务质量降低, 规定 PU 按照完全服务方式占用信道, 即只要 PU 缓冲区中有数据分组存在就一直占用信道进行传输, 直至缓冲区完全为空, 则释放信道进入非活动状态。基站维护轮询表并负责通告下一获得接入权的 SU。SU 在感知到 PU 不在活动状态时允许发送一个数据分组。按照限定($k=1$)服务方式规定, 每个 SU 每次仅使用信道发送一个数据分组。

为保证次用户使用信道的公平性, 接入相同授权信道的次用户按一定的逻辑次序顺序循环获得信道占用权, 以图 1 为例, 信道 1 的使用权则按照 PU₁→SU₁₁→PU₁→SU₁₂→PU₁→SU₁₃→PU₁→SU₁₁…的顺序分配给各个用户。

2.2 调度策略

由于信道的释放和占用均要消耗时间, 而信道释放期间无法进行有效的数据传输, 因此高频率的信道使用权切换会造成一定程度的资源浪费。考虑上述原因, 本文设计在基站控制下, 使用权列表中

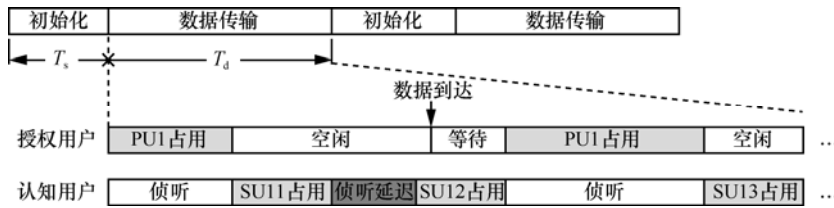


图2 信道接入策略

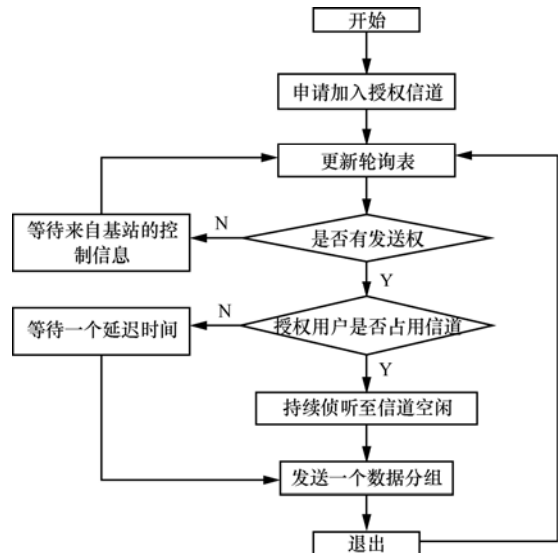
的下一用户在当前用户的数据发送过程中就提前预约信道,降低信道释放时间造成的时延增加,提高信道利用率。

用户接入过程由网络初始化 T_s 和数据传输 T_d 两部分构成。 T_s 为固定长度,次用户在此期间确定最优接入目标信道,并通过基站构建轮询表。 T_d 根据数据业务量长度可变。用户通过能量检测的方法感知信道是否可用^[14,15]。数据传输过程中,基站在对当前用户发送的数据进行 ACK 确认时,捎带公告下一个获得信道使用权的用户。当对应用户收到该 ACK 消息后可立即开始发送数据,有效提高信道利用率,有利于减小等待时延。图 3 为主、次用户的接入控制流程。次用户有数据到达需要发送时,通过一定的方法判断各授权信道的可用度,选择最优信道申请加入,并获取所在授权信道的主用户信息和次用户接入轮询顺序列表。如果为轮询列表中的下一发送用户,即可进行频谱检测,当发现主用户忙时,则持续监测至信道空闲后立即按照接入顺序列表进行信道占用;若发现信道空闲,则经过一个侦听延迟后轮询顺序列表中的下一用户进行信道接入。主用户在完成数据发送后释放信道,当有新数据到达时转为活动状态开始侦听信道,一旦信道由忙转为空闲则在时隙开始时立即发送数据,若信道空闲则经过一个侦听较短延迟 r 后占用信道。如图 2 所示,假设次用户发送一个数据分组的平均时间为 b ,由于次用户每次仅允许发送一个数据分组,因此当主用户释放信道后有新数据到达,相比独占信道时至多增加的等待时延为 $\max(r, b)$ 。

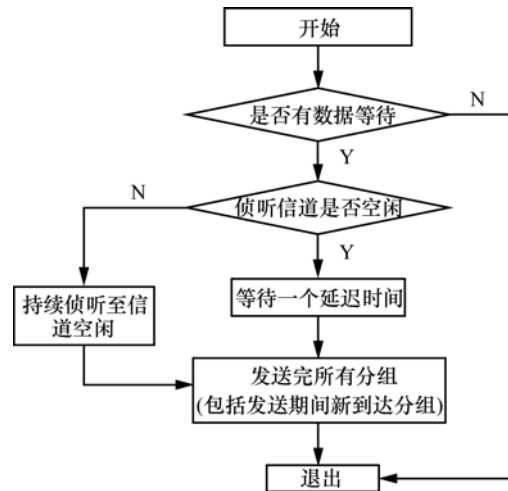
3 性能评估

3.1 假设条件

假设网络处于理想状态下,主用户及次用户均能正确检测信道,次用户的频谱检测过程相互独立。各用户及基站间通信正常,数据交换成功,用户缓冲区没有数据溢出且。信道纠错由物理层差错检测机制处理。



(a)次用户接入流程



(b)主用户接入流程

图3 信道接入控制流程

主用户数据按照均值为 λ_h 的泊松分布到达缓冲区排队等待,次用户数据到达符合相互独立的均值为 λ_i 的泊松分布。数据发送时间为独立同分布的均匀分布,均值分别为 β_h 和 β_i 。基站发送 ACK 帧用于确认用户数据是否成功发送,包括告知主用户数据是否全部发送,并捎带对下一活动用户的数据请

求；否则经过一个长度为 r 的超时周期请求用户无响应，则判定该用户无数据发送，轮询表中下一活动用户开始接入信道。时间轴以用户发送一个数据分组的平均时间为时隙单进行划分，用户仅在时隙开始时进行数据传输。

基于上述条件，本节将采用嵌入式马尔可夫链和概率母函数的方法对该频谱接入策略建立数学模型并对网络吞吐量、数据发送平均等待时延等关键参数进行解析。

3.2 模型描述

以数据发送的开始时刻为嵌入点建立数学分析模型。定义随机变量 $\xi_i(n)$ 为次用户 Q_i ($i=1,2,L,N$) 在 t_n 时刻发送数据时 Q_i 缓冲区中排队等待的数据分组数。次用户 Q_i 按并行限定服务策略发送数据。主用户 Q_p 有数据到达，则在 t_n^* 时刻按完全服务策略发送数据完成数据发送，此后 $i+1$ 次用户在 t_{n+1} 时刻开始发送数据， $t_n < t_n^* < t_{n+1}$ 。系统具有状态变量，此时，系统状态变量为 $\{\xi_1(n), \xi_2(n), L, \xi_N(n), \xi_p(n)\}$, $\{\xi_1(n^*), \xi_2(n^*), L, \xi_N(n^*), \xi_p(n^*)\}$ 和 $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), L, \xi_N(n+1), \xi_p(n+1)\}$ 。

假设系统在稳定条件 $\sum_{i=1}^N \rho_i + \rho_p < 1$ ($\rho_i = \lambda_i \beta_i$, $\rho_p = \lambda_p \beta_p$) 下，具有唯一的稳态分布。

在 t_n 时刻，系统状态概率分布为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_j(n) = x_j; j = 1, 2, L, N, p] = \pi_i(x_1, x_2, L, x_i, L, x_N, x_p) \quad (1)$$

在 t_n^* 时刻，系统状态概率分布为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_j(n^*) = y_j; j = 1, 2, L, N, p] = \pi_i(y_1, y_2, L, y_i, L, y_N, y_p) \quad (2)$$

运用嵌入式马尔可夫链和概率母函数的分析方法，可建立系统状态概率母函数

$$G_i(z_1, L, z_N, z_p) = \sum_{x_1=0}^{\infty} L \sum_{x_N=0}^{\infty} \sum_{x_p=0}^{\infty} z_1^{x_1} L z_N^{x_N} z_p^{x_p} \pi_i(x_1, L, x_N, x_p) \quad (3)$$

$$G_p(z_1, L, z_N, z_p) = \sum_{y_1=0}^{\infty} L \sum_{y_N=0}^{\infty} \sum_{y_p=0}^{\infty} z_1^{y_1} L z_N^{y_N} z_p^{y_p} \pi_i(y_1, L, y_N, y_p) \quad (4)$$

根据服务规则，系统变量满足式(5)。

$$\begin{cases} \xi_j(n+1) = \xi_j(n^*) + \eta_j(v_p), j \neq p \\ \xi_j(n+1) = 0, j = p \\ \xi_j(n^*) = \xi_j(n) + \eta_j(v_i), j \neq i, \xi_i(n) \neq 0 \\ \xi_j(n^*) = \xi_j(n) + \eta_j(v_i) - 1, j = i, \xi_i(n) \neq 0 \\ \xi_j(n^*) = \xi_j(n) + \mu_j(u_i), j \neq i, \xi_i(n) = 0 \\ \xi_j(n^*) = \mu_j(u_i), j = i, \xi_i(n) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$v_i(n)$ 表示 i 次用户的数据传输时间， $\eta_j(v_i)$ 为在此服务时间内进入用户 j 的数据分组数。 $u_i(n)$ 为用户在侦听到信道为空闲时需要等待的延迟时间， $\mu_j(u_i)$ 为在此时间内进入节点 j 的数据分组数。 $\eta_j(v_p)$ 为在 v_p 内到达 j 用户的数据分组数量， v_p 为主用户 Q_p 按完全服务发送所有数据所耗费的时间，发送第 m 时隙 Q_p 中的排队数据，以及在发送期间新进入其缓存中的数据所需要的时间为 $V_{p,m}$ ，且 $V_{p,m} = \sum_{l=1}^{\xi_p(m)} \left(S_{p,l} + \sum_{k=1}^{S_{p,l}} V_{p,k} \right)$ ， $S_{p,l}$ 为第 l 个数据的发送时间。

假设按完全服务方式发送任一时隙期内进入任一节点的数据分组所需时间为随机变量，且服从于一个相互独立、同分布的概率分布，其分布的概率母函数由下式计算。

$$F(z_p) = E[z_p^{V_{p,m}}] = E[z_p^A F(z_p)^A] = E[B^{\xi_p(m)}(z_p F(z_p))] = A(B(z_p F(z_p)))$$

其中， $A = \sum_{l=1}^{\xi_p(m)} S_{p,l}$ ， $A_j(z_j)$ 、 $B_j(z_j)$ 和 $R_j(z_j)$ ， $j=1,2,L,N,p$ 分别表示各用户数据分组到达过程、服务过程和查询转换过程的概率母函数。

根据式(5)，计算得出 t_{n+1} 时刻系统状态变量的概率母函数：

$$G_{i+1}(z_1, z_2, L, z_N, z_p) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n+1)} z_p^{\xi_p(n+1)} \right] = G_{ip} \left(z_1, L, z_N, B_p \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) F_p \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) \right) \right) \quad (6)$$

t_n^* 时刻系统状态变量的概率母函数：

$$G_p(z_1, z_2, L, z_N, z_p) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N z_j^{\xi_j(n^*)} z_p^{\xi_p(n^*)} \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{z_i} B_i \left(A_p(z_p) \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) \\
 &\left[G_i(z_1, L, z_N, z_p) - G_i(z_1, L, z_N, z_p) \Big|_{z_i=0} \right] + \\
 &R_i \left(A_p(z_p) \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) G_i(z_1, L, z_N, z_p) \Big|_{z_i=0} \quad (7)
 \end{aligned}$$

注：该模型中假设次用户间具有对称特性，即具有相同的数据到达率、发送时间和侦听延迟时间。

3.3 系统特性分析

定义 $g_i(j)$ 表示在 t_n 时刻普通开始节点发送数据时，节点 j 缓冲区内平均等待的数据分组数，在 t_n^* 时刻中心节点开始发送数据时，节点 j 缓冲区内平均等待的数据分组数为 $g_{ip}(j)$ 。

定义 $g_i(j)$ 和 $g_{ip}(j)$ 如下：

$$g_i(j) = \lim_{z_1, L, z_j, L, z_N, z_p \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, L, z_j, L, z_N, z_p)}{\partial z_j} \quad (8)$$

$$g_{ip}(j) = \lim_{z_1, L, z_j, L, z_N, z_p \rightarrow 1} \frac{\partial G_{ip}(z_1, L, z_j, L, z_N, z_p)}{\partial z_j} \quad (9)$$

$$g_i(j, k) = \lim_{z_1, L, z_j, L, z_k, L, z_N, z_p \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_i(z_1, z_2, L, z_j, L, z_k, L, z_N, z_p)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (10)$$

$$g_{ip}(j, k) = \lim_{z_1, L, z_j, L, z_k, L, z_N, z_p \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_{ip}(z_1, z_2, L, z_j, L, z_k, L, z_N, z_p)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, L, N; j = 1, 2, L, N, p; k = 1, 2, L, N, p$$

通过建立线性方程组可获得 $g_{ip}(p)$ ， $g_{ip}(p, p)$ 以及 $g_i(i)$ 的精确数学解析^[14]。

3.3.1 吞吐量

吞吐量是指单位时间内授权信道上所能传输

$$\begin{aligned}
 E[w_i] &= \frac{1}{\lambda C} g_i(i) - \frac{1}{\lambda} \frac{A'(1)}{2\lambda^2} = \frac{1-\rho_h}{2(1-N\rho-\rho_h)} \left\{ \frac{(1-N\rho-\rho_h+N\lambda\gamma)(1+\rho_h)}{\lambda^2\gamma(1-\rho_h)} (\gamma A'(1) + \lambda^2 R''(1)) + \frac{\rho_h^2(1-N\rho-\rho_h+N\lambda\gamma)}{\lambda^2(1-\rho_h)^2} A_h''(1) + \right. \\
 &\quad \left. \lambda\gamma [N\gamma(\beta-\gamma)A'(1) - N\lambda^2\gamma R''(1)] + \frac{1}{1-\rho_h} (2N\lambda^2\gamma\rho_h R''(1) + 2N\lambda^2\gamma\rho_h(\beta-\gamma) + 2\gamma(1-\rho-\rho_h) + \lambda\gamma\rho_h(1+\rho_h) - (N-1)\lambda\gamma^2 + 2(N-1)\lambda\gamma(\gamma-\beta)) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{\lambda}{(1-\rho_h)^2} (N\lambda\gamma B''(1) + \rho_h^2(1-N\rho-\rho_h)R''(1) + \gamma\beta_h^2(\rho_h + N\lambda(\beta-\gamma))A_h''(1) + \lambda_h\gamma B_h''(1)) \right\} - \frac{1}{\lambda} - \frac{A'(1)}{2\lambda^2} \quad (13)
 \end{aligned}$$

4 仿真实验

基于 MATLAB7.0 在图 1 所示场景下进行仿真分析，主用户和用户对信道的占用符合参数为 λ_p 、 β_p 和 λ_i 、 β_i 、 γ 的轮询控制模型，按照图 3 所示流程对信道吞吐量以及授权和次用户的数据分组

的信息分组数。由于轮询接入方式可实现无冲突的数据传输，授权信道吞吐量可由下式计算。

$$T = \sum_{j=1}^M \rho_j$$

其中， M 为用户数， $\rho_j = \lambda_j \beta_j$ 。

当授权信道被 1 个主用户和 N 个次用户共享时，该信道的吞吐量为。

$$T = \rho_p + \sum_{i=1}^N \rho_i$$

其中， $\rho_p = \lambda_p \beta_p$ ， $\rho_i = \lambda_i \beta_i$ 。

3.3.2 数据分组平均等待时间

数据分组等待时延 w_j ，定义为该数据分组进入用户 j 到其被发送的间隔时间， $E[w_p]$ 和 $E[w_i]$ 分别定义为主用户和次用户中数据分组的平均等待时延。基于笔者在文献[13]中的分析，主用户按完全服务策略接受服务器访问，分析计算得到顾客平均等待时间为

$$E[w_p] = \frac{g_{ip}(p, p)}{2\lambda_p g_{ip}(p)} - \frac{A_p''(1)}{2\lambda_p^2(1+\rho_p)} + \frac{\lambda_p B_p''(1)}{2(1-\rho_p)} \quad (12)$$

其中，

$$\begin{aligned}
 g_{ih}(h, h) &= [A_h''(1)\beta + \lambda_h^2 B''(1) - \lambda_h^2 R''(1) - A_h''(1)\gamma] \\
 &\quad \frac{N\lambda\gamma}{1-N\rho-\rho_h+N\lambda\gamma} + \lambda_h^2 R''(1) + A_h''(1)\gamma \\
 g_{ih}(h) &= \frac{\lambda_h\gamma(1-\rho_h)}{1-\rho_h-N\rho+N\lambda\gamma}
 \end{aligned}$$

次用户占用信道后按限定($k=1$)服务策略发送数据，分析计算得到数据在其缓存区内排队等待发送的平均时间为

平均等待时延进行仿真和统计。

假设主用户具有归一化后的数据到达率 $\lambda_p = 0.5$ (分组/时隙)，服务时间 $\beta_p = 1$ (时隙)；次用户具有归一化后的服务时间 $\beta_i = 1$ (时隙)；判断延迟时间 $\gamma = 1$ (时隙)。表 1 所示为次用户数 $N=10$ ，随次用户数据到达率增加，信道吞吐量 T 、主用

户和次用户数据分组平均等待时延的变化情况。如表 1 所示，随着次用户数据到达率从 0.005(分组/时隙)增加至 0.04(分组/时隙)，信道吞吐量由 0.5 提高至 0.9，但次用户的加入未影响到主用户的时延特性，在此过程中主用户平均等待时延并未增加。

表 1 次用户数据到达率不同时吞吐量及平均等待时延比较

网络类型	λ_s	吞吐量 T	$E[W_p]$	$E[W_s]$
传统网络	—	0.5	0.166 7	—
认知网络	0.005	0.55	0.166 7	11.722 2
	0.01	0.6	0.166 7	13.250 0
	0.015	0.65	0.166 7	15.214 3
	0.02	0.7	0.166 7	17.833 3
	0.025	0.75	0.166 7	21.500 0
	0.03	0.8	0.166 7	27.000 0
	0.035	0.85	0.166 7	36.166 7
	0.04	0.9	0.166 7	54.500 0

如表 1 所示，随着次用户数据到达率从 0.005(分组/时隙)增加至 0.04(分组/时隙)，信道吞吐量由 0.5 提高至 0.9，次用户的加入未影响到主用户的时延特性，在此过程中主用户平均等待时延并未增加；但观察表 1 第 4 行发现，当吞吐量大于 0.7 后网络虽能稳定工作但次用户平均等待时延迅速加大，因此信道吞吐量需根据具体业务时延要求控制在一定范围内。

假设主用户具有归一化后的数据到达率 $\lambda_p = 0.5$ (分组/时隙)，服务时间 $\beta_p = 1$ (时隙)；次用户的数据到达率 $\lambda_i = 0.01$ (分组/时隙)，服务时间 $\beta_i = 2$ (时隙)；判断延迟时间 $\gamma = 1$ (时隙)。表 2 所示为随次用户数量增加，信道吞吐量 T 、主用户和次用户数据分组平均等待时延的变化情况。

如表 2 所示，随着次用户数量从 1 增加至 20，信道吞吐量由 0.5 提高至 0.9，次用户的加入在一定程度上影响到主用户的时延特性，在此过程中主用户平均等待时延由 0.166 7(时隙)增加至 0.566 7(时隙)。与此相对应，表 3 为其他条件不变， $\beta_p = \beta_i = 1$ (时隙)的情况下获得的仿真数据。

表 2 次用户数量不同时吞吐量及平均等待时延比较 (主、次用户平均服务时间不相同)

网络类型	N	吞吐量 T	$E[W_p]$	$E[W_s]$
传统网络	—	0.5	0.166 7	—
认知网络	1	0.52	0.186 7	1.625 0
	2	0.54	0.206 7	2.847 8
	4	0.58	0.246 7	5.642 9
	6	0.62	0.286 7	9.026 3
	8	0.66	0.326 7	13.205 9
	10	0.7	0.366 7	18.500 0
	15	0.8	0.466 7	41
	20	0.9	0.566 7	108.500 0

表 3 中主用户平均等待时延并未随次用户数量的增加而增加。这是由于当次用户的平均服务时间 β_i 较大时，在此期间到达主用户的分组需等到该次用户完成一次发送后才能获得信道使用权，导致每次等待的相对时间较大，造成平均等待时延增加。由此可见，采用本文所述频谱接入策略时，应尽量采用短分组以减小每次 SU 占用信道的的时间，从而降低主用户中数据等待发送的概率及时间。同样，由于高负载时次用户平均等待时延增加，具体应用时需根据用户具体业务要求将负载控制在一定范围内。

表 3 次用户数量不同时吞吐量及平均等待时延比较 (主、次用户平均服务时间相同)

网络类型	N	吞吐量 T	$E[W_p]$	$E[W_s]$
传统网络	—	0.5	0.166 7	—
认知网络	1	0.51	0.166 7	1.540 8
	2	0.52	0.166 7	2.625 0
	4	0.54	0.166 7	4.934 8
	6	0.54	0.166 7	7.454 5
	8	0.58	0.166 7	10.214 3
	10	0.6	0.166 7	13.250 0
	15	0.65	0.166 7	22.357 1
	20	0.7	0.166 7	34.500 0

5 结束语

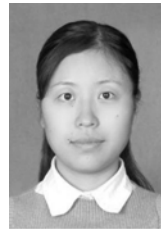
本文考虑未来无线网络中频谱资源匮乏的问题，针对应急通信业务对时延特性的要求，提出了基于轮询控制的机会频谱接入方法，并构建了该接入策略下各用户数据的排队模型，分析了一定网络环境下的网络吞吐量、主用户和次用户的平均等待

时延,与传统网络主用户独占信道相比,本文方案在保证主用户时延性不受损失的情况下增加了网络吞吐量,具有一定的优越性。文章所述方案基于有基础设施的理想网络,因此针对更为灵活的自组织网络和更接近实际网络环境下的研究还有待进一步深入。

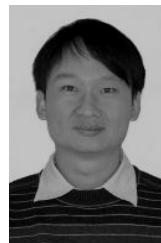
参考文献:

- [1] CLAUDIA C, KAUSHIK R C. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(7): 1315-1329.
- [2] 顾成杰, 张顺颐, 孙雁飞. 基于业务感知和策略选择的认知路由算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(11):168-175.
GU C J, ZHANG S Y, SUN Y F. Cognitive network routing algorithm based on service awareness and policy choice[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(11): 168-175.
- [3] MASKERY M, KRISHNAMURTHY V, ZHAO Q. Decentralized statistic spectrum access for cognitive radios: cooperative design of a non-cooperative game[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(2): 459-469.
- [4] CHEN Y, ZHAO Q, SWAMI A, *et al.* Distributed spectrum sensing and access in cognitive radio networks with energy constraint[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(2) : 783-797.
- [5] CHEN Y, ZHAO Q. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(5) : 2053-2071.
- [6] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework[J]. *IEEE JSAC: Special Issue on Adaptive, Spectrum Agile and Cognitive Wireless Networks*, 2007, 25(3): 589- 600.
- [7] 孙君, 朱洪波. 物联网距离和业务特征结合的频谱接入方法[J]. *通信学报*, 2012, 33(4): 25-30.
SUN J, ZHU H B. Opportunistic spectrum accessing joint distance with service characteristics in IOT networks[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(4): 25-30.
- [8] 孙君, 朱洪波. Ad Hoc 网络中基于距离的机会频谱接入方案[J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1679-1682.
SUN J, ZHU H B. Opportunistic spectrum access based on distance over ad hoc networks[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2011, 39(7): 1679-1682.
- [9] CHEN Q, LIANG Y C. A two-level MAC protocol strategy for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(5): 2164-2180.
- [10] MOHAMMAD M R, Md J H, EKRAM H, *et al.* Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: a queueing analytic model and admission controller design[A]. *Global telecommunications conference, GLOBECOM'07*[C]. Washington, DC, USA, 2007. 4647-4652.
- [11] GUAN Z, ZHAO D F, ZHAO Y F. A discrete time two-level mixed service parallel polling model[J]. *Journal of Electronics*, 2012, 29(1/2):103-110.
- [12] LIU Q L, ZHAO D F. Analysis of two-level-polling system with mixed access policy[A]. *IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*[C]. Changsha, China, 2009. 357-360.
- [13] 杨志军, 赵东风, 丁洪伟等. 两级优先级控制轮询系统研究[J]. *电子学报*, 2009, 37(7), 1452-1456.
YANG Z J, ZHAO D F, DING H W, *et al.* Research on two-class priority based polling system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1452-1456.
- [14] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C Y, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [15] CHEN Q, GAO F, NALLANATHAN A, *et al.* Improved cooperative spectrum sensing in cognitive radio[A]. *IEEE VTC-Spring '08*[C]. Singapore, 2008. 1418-1422.

作者简介:



官铮(1982-),女,云南普洱人,云南大学博士生,主要研究方向为无线传感器网络、网络接入技术、系统性能分析和优化等。



钱文华(1980-),男,云南曲靖人,博士,云南大学讲师,主要研究方向为计算机网络、图像处理等。

虞美乐(1990-),男,湖南郴州人,云南大学本科生,主要研究方向为无线传感器网络、网络接入技术。