

文章编号: 2095-4980(2016)02-0206-06

认知网络中基于用户带宽需求的频谱接入策略

胡丽华, 陈晓光

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200082)

摘要: 针对认知网络中的频谱接入问题, 基于多类用户不同带宽需求提出了一种新的频谱接入策略, 即基于用户带宽的动态信道接入策略(BRDSA)。首次提出考虑拥有不同带宽需求的主用户和次用户利用频谱聚合技术进行频谱接入, 而频谱聚合技术能够提高次用户对离散频谱的利用率。根据相关网络模型, 利用排队理论和马尔科夫模型对整个系统状态进行了分析。仿真结果表明这种动态频谱接入策略极大地提高了频谱利用率。

关键词: 多带宽需求; 频谱聚合; 频谱接入; 排队论; 马尔科夫模型

中图分类号: TN926^{+.1}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0206

Dynamic spectrum access strategy based on users' band requirements in cognitive radio network

HU Lihua, CHEN Xiaoguang

(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200082, China)

Abstract: Concerning the spectrum access problem in cognitive radio network, a new spectrum access strategy Based on users' Requirements Dynamic Spectrum Access(BRDSA) is proposed based on multi-class users' different band requirements. It is the first time to consider the different band requirements of primary users and secondary users, using channel assembling technology which can help the user to utilize the discrete spectrum. According to the proposed network model, the queuing theory and Markov chain model are used to analyze the transformation of system status. The simulation results show that the BRDSA strategy can greatly improve the spectrum utilization.

Key words: different band requirements; channel assembling; spectrum access; queuing theory; Markov chain model

近年来由于频谱资源的日趋紧张, 认知无线网络引起了许多人的关注。所谓的认知无线网, 就是网络中具有认知功能的设备, 能够根据自身所处的无线环境进行自身相关参数的调整。认知无线网络中关键的问题包括: 频谱感知, 频谱管理, 频谱共享和频谱移动性技术等^[1]。频谱接入一直是认知无线网络中频谱管理的一个重要问题。如何更加真实有效模拟和分析主用户(Primary User, PU)和次用户(Secondary User, SU)的行为是解决该问题的关键点。文献[2]提出了一种PU优先的马尔科夫模型, 当PU出现并随机接入一个正在被SU使用的信道时, SU必须退让出此信道, 因此这种策略会很容易使SU产生掉话。文献[3]和[4]提出了具有2种不同带宽需求的认知用户, 并且能够利用频谱聚合技术在不连续的子信道上进行传输与切换, 但是文中的主用户所占用的信道仍是固定的。上述论文都没有考虑到具有不同带宽需求的主用户, 但是在现有的认知无线网络标准IEEE802.22中, 主用户往往占用的是多个子信道^[5]。因此本文提出了一种新的基于用户带宽需求的频谱接入策略(BRDSA), 并利用马尔科夫模型以及排队模型, 对整个网络的频谱系统信道占用情况进行分析。

1 系统模型

1.1 小区网络系统模型

在本文提出的小区网络系统模型中, 系统分配给主用户数量不等的特定子信道, 最多 α 个, 最少 β 个。假设系统中, 共有 M 个主用户, S 个授权子信道。次用户可使用空闲的子信道, 若此空闲子信道所属主用户到来时,

收稿日期: 2015-03-05; 修回日期: 2015-03-31

次用户必须退出并进行切换, 无法进行切换的次用户将会进入队列等待或掉话。

次用户可分为实时用户(Real-time Second User, RSU)以及灵活用户(Elastic Second User, ESU)。RSU 是指为保证通信传输质量需要固定传输带宽的用户; 而 ESU 是指传输信道带宽可以根据网络情况可变的用户, 对传输时延要求不严格^[6]。RSU 固定使用 a 个信道进行传输; ESU 可根据所在网络环境改变所使用的子信道数, 取值范围为 (V, W) , 其中 V 是保证 ESU 用户正常传输的最少信道数, W 为最多传输信道数。次用户可利用载波聚合技术聚合不连续信道进行传输^[7]。系统需要时, ESU 可以在保证自己最小信道数的前提下, 出让占用的部分子信道。

1.2 队列模型

在图 1 的系统队列模型中, 系统中有 EQ 和 RQ 这 2 个队列, 分别表示 ESU 和 RSU 用户等待队列, 队列最大长度分别为 Q_{LE} 和 Q_{LR} 。当新用户 ESU 和 RSU 到来时, 分别进入各自队列等待; 若队列已满则新用户被阻塞。其中被 PU 打断服务且无法切换的 ESU 在队列 EQ 未满时, 可以进入队首等待; 若同时有多个被中断且无法切换的 ESU, 则根据所需信道数由小到大排在队首; 被中断服务且无法切换的 RSU 则直接掉话, 不进入队列 RQ。

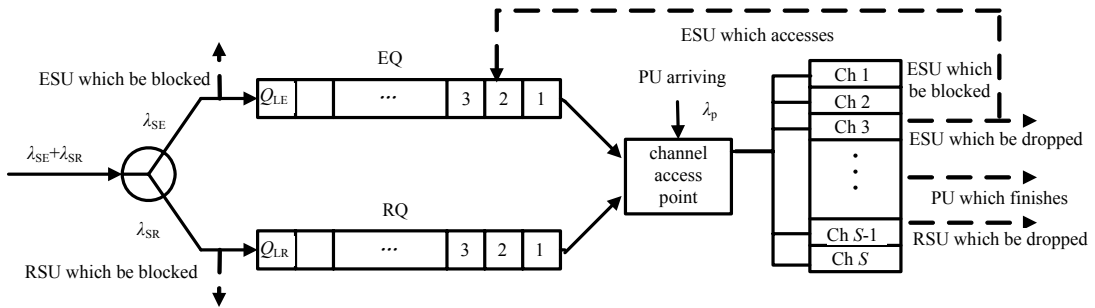


Fig.1 System queue model
图 1 系统队列模型

2 基于用户带宽需求的接入策略 BRDSA 及系统状态分析

本文提出的 BRDSA, 主要分析了拥有多类带宽需求的用户网络模型的频谱接入问题。系统稳定状态将会由以下几种情况触发, 并发生变化(在同一个时刻只考虑一种情况的发生)。

2.1 主用户到来

PU_η 是指拥有 η 个子信道的 PU。当 PU_η 到达时, 在这 η 个信道上 RSU 情况可用向量 $\Phi_{RSU} = (r_1, r_2, \dots, r_a)$ 表示, r_a 为占用 a 个信道的 RSU 数。一共有 r_{sum} 个 RSU 共需要 r_{sc} 个切换信道, 所需切换信道最少的 RSU 需要 r_{min} 个子信道。ESU 在 η 个信道上的使用情况可表示为矩阵 Φ_{ESU} , 即

$$\Phi_{ESU} = \begin{bmatrix} e_{V,1} & e_{V,2} & \dots & e_{V,V} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_{V+1,1} & e_{V+1,2} & \dots & e_{V+1,V} & e_{V+1,V+1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ & & & \dots & e_{i,j} & \dots & 0 \\ e_{W,1} & \dots & & \vdots & & & e_{W,W} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $e_{i,j}$ 表示拥有信道总数为 i , 并在这 η 个信道中占用了 j 个信道的 ESU 数目。此 η 个信道上一共有 ESU e_{sum} 个, 共占用信道 e_{sc} 个。其中 ESU 还分为 2 种切换优先级: 优先级一级是指 $j > i - V$ 的 ESU, 此类 ESU 若放弃了其在 η 个信道上的信道, 则所拥有信道数小于最小信道需求, 将会面临掉话; 优先级二级是指 $j \leq i - V$ 的 ESU, 即在放弃其在 η 个信道上的信道后, 仍能至少保持最小传输带宽的 ESU。因此切换优先级为一级的 ESU 有 H_1 个, 且所需总信道数为 HC_1 ; 切换优先级为二级的 ESU 总数可表示为 H_2 个, 且所需总信道数为 HC_2 。

假设当新 PU_η 到达系统时, 若所属于它的授权子信道都为空闲信道时, 它可以直接利用。但是如果这 η 个信道上还有其他次用户正在传输时, 这些次用户则将需要出让各自在 η 内所占有的信道, 并将面临切换信道, 进入缓存或者掉话。当这 η 个信道上, 只有 RSU 存在时, 则根据需切换信道由少到多分配空闲信道; 若空闲信道不足, 则由系统中不占用 η 中信道的其他 ESU 出让剩余所需信道, 出让顺序从占有信道数最多的 ESU 开始, 并保证出让后的 ESU 拥有最小正常传输带宽; 如果还是不够, 则无法切换的 RSU 将会掉话。当这 η 个信道上, 只有 ESU 存在时, 先考虑切换一级 ESU。若空闲信道不足够保证一级 ESU, 则由其他不受影响的 ESU 出让信道; 在分配

完一级 ESU 后, 仍有空闲信道时, 再将所剩信道分配给二级 ESU, 但是不考虑由其他 ESU 出让信道; 若仍有剩余 ESU 无法切换时, 则将这部分 ESU 根据所需信道从少到多缓存进入队列 EQ 的队首。若队列已满, 则剩余 ESU 掉话; 当这 η 个信道上, RSU 和 ESU 同时存在时, 则先考虑 RSU 切换, 再考虑 ESU。切换规则和前面所述相同。

$x=(m_\alpha, \dots, m_\beta, g_\alpha, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq})$ 表示系统中正在传输的各类用户数目情况, 其中 m_α 表示系统中拥有信道数为 α 的主用户数量; g_α 表示拥有固定信道数为 α 的 RSU 数量; j_w 表示拥有信道数 w 的 ESU 数量; j_{eq} 和 j_{rq} 表示队列 EQ 和 RQ 的队列长度。系统可达到状态集合可表示为:

$$\Omega = \left\{ x \left| \begin{array}{l} m_\alpha, \dots, m_\beta, g_\alpha, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq} \geq 0; C_{\text{sum}}(x) \leq S, j_{eq} \leq Q_{LE}, j_{rq} \leq Q_{LR}; \\ \text{if } j_{eq} > 0, C_{\text{idle}} + C_{\text{denote}} < v; \text{if } j_{rq} > 0, C_{\text{idle}} + C_{\text{denote}} < \alpha \end{array} \right. \right\} \quad (2)$$

式中: C_{PU} 表示被 PU 使用的信道总数; C_{RSU} 和 C_{ESU} 分别表示被 RSU 和 ESU 使用的信道总数, 正在被使用的信道总数为 $C_{\text{sum}} = C_{\text{PU}} + C_{\text{RSU}} + C_{\text{ESU}}$ 。

此时在系统中不占用这 η 个信道的用户状态可表示为 $\theta = (m_\alpha, \dots, m_\beta, g_\alpha', j_v', \dots, j_w', j_{eq}, j_{rq})$, 空白信道一共有 C_{idle} 个, 在 θ 中的 ESU 一共可出让 C_{denote} 个信道。当主用户到来, 系统状态 $(m_\alpha, \dots, m_\beta, g_\alpha, j_v, \dots, j_w)$ 转移情况见表 1。

2.2 次用户到来

当到来的是 RSU 时, 若空闲信道大于 a , 则 RSU 将会随机选取其中 a 个信道聚合并传输; 若空闲信道不足 a 时, 则由系统中的 ESU 按拥有信道数从多到少逐次开始出让所需信道, 并保证出让后的 ESU 仍拥有最小信道数; 若信道还是不足, 则此 RSU 将进入队列 RQ 队尾; 若队列已满, 则面临阻塞。

当到来的是 ESU 时, 若空闲信道满足最小信道数, 则 ESU 将聚合至少 V 个, 至多 W 个信道; 当空闲信道不足以提供最小信道数时, 由其他 ESU 出让信道以保证其以最小信道数 V 进行正常传输; 若空闲信道和出让信道仍然不够时, 则此 ESU 将进入队列 EQ; 若队列已满, 则面临阻塞。当次用户到来时具体状态转移情况见表 2。

2.3 主用户或次用户离开

当占有 k 个子信道的主用户或次用户完成服务而离开系统时, 即意味着有 k 个信道空出。若 EQ 和 RQ 只有 1 个非空时, 即将所有空闲信道都分配给它; 若 EQ 和 RQ 都非空时, 则根据队列调度算法将空闲信道分配给 2 个队列。具体分配算法流程如下: a) 初次根据调度因子 δ 给 RSU 和 ESU 分配信道数分别为 n_r 和 n_e ; b) 计算 EQ 队列中的 ESU 所需信道数的上下界 $n_{eq, \max}$ 和 $n_{eq, \min}$; c) 计算 RQ 队列中 RSU 所需信道数 $n_{rq, \max}$; d) 计算实际分配给 RSU 和 ESU 的信道数 n_r 和 n_e 。系统状态转移情况见表 3。

3 系统性能分析

为进一步分析提出的 BRDSA 策略, 本文利用 MATLAB 对此策略的频谱利用率、次用户网络容量、次用户阻塞率和掉话率以及平均时延等, 进行仿真和性能分析。其中, 假设的认知无线网络是一个拥有 10 个授权子信道, 有限个主用户(2 个拥有 2 条授权子信道, 另 2 个拥有 3 个子信道)以及无限个次用户的网络。主用户、ESU 和 RSU 到达率分别为 $\lambda_p, \lambda_{SE}, \lambda_{SR}$, 用户到达过程服从泊松分布; 主用户、ESU 和 RSU 服务完成率为 μ_p, μ_{SE} 和 μ_{SR} 。基本参数设置为 $\lambda_p=1, \lambda_{SE}=2, \lambda_{SR}=1, \mu_p=0.5, \mu_{SE}=1, \mu_{SR}=1, L_{EQ}=2, L_{RQ}=1$ 。其中 $\pi(x)$ 表示系统处于稳定状态 $x(x \in \Omega)$ 的概率。

3.1 频谱利用率

本文中频谱利用率是指系统中信道的平均利用率^[8], 可表示为 U_{CRN} 。从图 2 中可看出, BRDSA 策略的频谱利用率是极高的, 在 $\lambda_{SE}=3$ 时, 频谱利用率达到了 95%, 而且 U_{CRN} 会随着次用户 ESU 的到达率 λ_{SE} 不断增大而增大, 并且趋于一定值。 $C_{\text{sum}}(x)$ 为正在使用中的信道总数, S 为系统中一共有信道数。

$$U_{\text{CRN}} = \sum_{x \in \Omega} p(x) \frac{C_{\text{sum}}(x)}{S} \quad (3)$$

3.2 次用户阻塞率和掉话率

ESU 和 RSU 的阻塞率分别为 $P_{b, \text{ESU}}$ 和 $P_{b, \text{RSU}}$, 掉话率分别为 $P_{f, \text{ESU}}$ 和 $P_{f, \text{RSU}}$ 。用户阻塞率和掉话率是无线网络的 2 个重要服务质量指标。图 3 显示了次用户的阻塞率和掉话率都随着主用户的到达率增大而增大。ESU 的阻塞率小于 RSU 的阻塞率是因为在本例中设置的 EQ 队列长度大于 RQ 队列长度。RSU 掉话率小于 ESU 掉话率, 是因为在切换过程中 RSU 的切换优先级大于 ESU。

表 1 主用户到来时系统状态转移表
Table1 States transitions when PU comes

activity and system channel state	next state	transfer rate
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=e_{\text{sum}}=0$ or $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}=0, C_{\text{idle}}\geq r_{\text{SC}}$ or $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0, C_{\text{idle}}\geq r_{\text{SC}}$	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v, \dots, j_w, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}=0, C_{\text{idle}}< r_{\text{SC}}, C_{\text{denote}}+C_{\text{idle}}\geq r_{\text{SC}}$ ESU_m denotes $(r_{\text{SC}}-C_{\text{idle}})$ channels	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v, \dots, j_{m-(r_{\text{SC}}-C_{\text{idle}})}+1, \dots, j_m-1, \dots, j_w, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M} \times j_m'$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}=0, C_{\text{idle}}< r_{\text{SC}}, C_{\text{denote}}+C_{\text{idle}}\geq r_{\text{SC}}$ ESU_m and ESU_n denotes $(r_{\text{SC}}-C_{\text{idle}})$ sub-channels	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v+1, \dots, j_{n-(r_{\text{SC}}-C_{\text{idle}}-m+v)}+1, \dots, j_n-1, \dots, j_m-1, \dots, j_w, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M} \times j_n'$
...	...	...
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}=0, r_{\text{min}}\leq C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}< r_{\text{SC}}$ the n_{th} ESU in j_m' which is the last one denotes sub-channels to the q RSU in r_p	$\left\{ m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a - \left(\sum_{i=p}^a r_i - q \right), j_v + \left[\sum_{i=m+l}^w j_i' + (n-1) \right], \dots, j_{m-K}+1, \dots, j_n-1, 0, \dots, 0, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}} \right\}$ which $K = \left\{ \sum_{i=1}^{p-1} (ir_i + pq) - \left[\sum_{i=m+1}^w (i-v)j_i' + (w-m)(n-1) \right] \right\}$	$\binom{j_m'}{n} \cdot \binom{r_p}{q} \cdot \frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}=0$ and $C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}< r_{\text{min}}$	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a - r_{\text{sum}}, j_v, \dots, j_w, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0$ and $e_{\text{SC}}> C_{\text{idle}}\geq HC_1$ ($C_{\text{idle}}-HC_1$) sub-channel just can be assigned to the p_{th} ESU in $e_{m,n}$ of H_2 and have D ESU get into EQ if $D\leq Q_{\text{LE}}-j_{\text{ed}}$	$\left[m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v, \dots, j_{v+n}, j_i - \sum_{j=n+1}^{i-v} e_{i,j}, \dots, j_m - \sum_{j=n+1}^{m-v} e_{m,j} - \right.$ $\left. (e_{m,n}-k), j_{m+1} - \sum_{j=n}^{m+1-v} e_{m+1,j}, \dots, j_k - \sum_{j=k}^{k-v} e_{i,j}, \dots, j_w - \sum_{j=k}^{w-v} e_{w,j}, j_{\text{eq}} + D, j_{\text{rq}} \right]$ which $D = \sum_{i=v+n+1}^m \sum_{j=n+1}^{i-v} e_{i,j} + (e_{m,n}-k) + \sum_{i=m+1}^w \sum_{j=n}^{i-v} e_{i,j}$ $K = C_{\text{idle}} - HC_1 - \left[\sum_{j=1}^{w-v} \sum_{i=v+1, i-j\geq v} j e_{i,j} + \sum_{i=v+n-1}^{m-1} n e_{i,n} + n(p-1) \right]$	$\binom{e_{m,n}}{p} \cdot \frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0$ and $e_{\text{SC}}> C_{\text{idle}}\geq HC_1$ $C_{\text{idle}}-HC_1$ sub-channel just can be assigned to the p_{th} ESU in $e_{m,n}$ of H_2 and $D>Q_{\text{LE}}-j_{\text{ed}}$	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v, \dots, j_{v+n}, j_{v+n+1} - e_{v+n+1, n+1}, \dots, j_i - \sum_{j=n+1}^{i-v} e_{i,j}, \dots,$ $j_m - \sum_{j=n+1}^{m-v} e_{m,j} - (e_{m,n}-k), j_{m+1} - \sum_{j=n}^{m+1-v} e_{m+1,j}, \dots, j_k - \sum_{j=k}^{k-v} e_{i,j}, \dots, j_w - \sum_{j=k}^{w-v} e_{w,j}, Q_{\text{LE}}, j_{\text{rq}}$	$\binom{e_{m,n}}{p} \cdot \frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0,$ $C_{\text{idle}}< HC_1, C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}\geq HC_1$ ESU_m denotes $(e_{\text{SC}}-C_{\text{idle}})$ channels	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v - e_{v+1, 1}, \dots, j_i - \sum_{j=1, i-j\geq v}^w e_{i,j}, \dots, j_{m-(HC_1-C_{\text{idle}})}+1,$ $j_m-1, \dots, j_w - \sum_{j=1, w-j\geq v}^w e_{w,j}, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M} \cdot j_m'$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0$ $C_{\text{idle}}< HC_1, C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}\geq HC_1$ ESU_m and ESU_n denote $(e_{\text{SC}}-C_{\text{idle}})$ channels	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v - e_{v+1, 1} + 1, \dots, j_i - \sum_{j=1, i-j\geq v}^w e_{i,j}, \dots, j_{n-(HC_1-C_{\text{idle}}-m+v)}+1,$ $\dots, j_n-1, \dots, j_m-1, \dots, j_w - \sum_{j=1, w-j\geq v}^w e_{w,j}, j_{\text{eq}}, j_{\text{rq}}$	$\frac{\lambda_p}{M} \cdot j_n'$
...	...	...
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0$ $HC_1>C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}, (HC_1-C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}})$ sub-channel just can be assigned to the k_{th} ESU in $e_{m,n}$ of H_1 and have D ESU get into EQ if $D\leq Q_{\text{LE}}-j_{\text{ed}}$	$\left[m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v - \sum_{j=n+1, v-j\geq 0}^w e_{v,j} + \left(\sum_{i=p+l}^w j_i' + q - 1 \right), \dots, j_i - \right.$ $\left. \sum_{j=n+1, v>i-j\geq 0}^w e_{i,j}, \dots, j_{CH_1 - \left[\sum_{i=p+l}^w (i-v)j_i' + (p-v)(q-1) \right]} + 1, \dots, j_p - q, 0, \dots, 0, j_{\text{eq}} + D, j_{\text{rq}} \right]$ which $D = \left[\sum_{i=v}^{m-1} \sum_{j=n+1, v>i-j\geq 0}^w e_{i,j} + \sum_{j=n, v>m-j\geq 0}^w e_{m,j} - k + \sum_{i=m+1}^w \sum_{j=n, v>i-j\geq 0}^w e_{i,j} \right]$	$\binom{e_{m,n}}{k} \cdot \binom{j_p'}{q} \cdot \frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}=0, e_{\text{sum}}\neq 0, HC_1>C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}},$ ($HC_1-C_{\text{idle}}+C_{\text{denote}}$) sub-channel just can be assigned to the k_{th} ESU in $e_{m,n}$ of H_1 and $D\leq Q_{\text{LE}}-j_{\text{ed}}$	$m_{\alpha}, \dots, m_{\eta}+1, \dots, m_{\beta}, g_a, j_v - \sum_{j=n+1, v-j\geq 0}^w e_{v,j} + \left(\sum_{i=p+l}^w j_i' + q - 1 \right), \dots,$ $j_i - \sum_{j=n+1, v>i-j\geq 0}^w e_{i,j}, \dots, j_{CH_1 - \left[\sum_{i=p+l}^w (i-v)j_i' + (p-v)(q-1) \right]} + 1, \dots, j_p - q, 0, \dots, 0, Q_{\text{LE}}, j_{\text{rq}}$	$\binom{e_{m,n}}{k} \cdot \binom{j_p'}{q} \cdot \frac{\lambda_p}{M}$
PU_{η} AR. $r_{\text{sum}}\neq 0, e_{\text{sum}}\neq 0$ the idle channel will be assigned to RSU first, then to ESU. The rule is the same as before.	...	...

表 2 次用户到来时系统状态转移表
Table2 States transitions when SU comes

activity and system channel state	next state	transfer rate
RSU AR. $C_{idle} \geq W$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a + 1, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	λ_{SR}
RSU AR, $a > C_{idle} \geq a - C_{denote}$ ESU _m denotes $(a - C_{idle})$ sub-channel	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a + 1, j_v, \dots, j_{m-(a-C_{idle})} + 1, \dots, j_m - 1, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	$j_m \cdot \lambda_{SR}$
RSU AR $a > C_{idle} \geq a - C_{denote}$ ESU _m and ESU _n denotes $(a - C_{idle})$ sub-channel	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a + 1, j_v + 1, \dots, j_{n-(a-C_{idle}-(m-v))} + 1, \dots, j_n - 1, \dots, j_m - 1, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	$j_n \cdot \lambda_{SR}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
RSU AR $C_{idle} + C_{denote} < a, j_{rq} < Q_{LR}$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq} + 1$	λ_{SR}
RSU AR $C_{idle} + C_{denote} < a, j_{rq} = Q_{LR}$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, Q_{LR}$	λ_{SR}
ESU AR $C_{idle} \geq W$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w + 1, j_{eq}, j_{rq}$	λ_{SE}
ESU AR $W > C_{idle} \geq V$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_{C_{idle}} + 1, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	λ_{SE}
ESU AR $C_{idle} < V, C_{idle} + C_{denote} \geq V$ ESU _m denotes $(V - C_{idle})$ sub-channels	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v + 1, \dots, j_{m-(V-C_{idle})} + 1, \dots, j_m - 1, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	$j_m \cdot \lambda_{SE}$
ESU AR $C_{idle} < V, C_{idle} + C_{denote} \geq V$ ESU _m and ESU _n denotes $(V - C_{idle})$ sub-channels	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v + 2, \dots, j_{n-V-C_{idle}-(m-v)} + 1, \dots, j_n - 1, \dots, j_m - 1, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	$j_n \cdot \lambda_{SE}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
ESU AR $C_{idle} + C_{denote} < V, j_{eq} < Q_{LE}$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w, j_{eq} + 1, j_{rq}$	λ_{SE}
ESU AR $C_{idle} + C_{denote} < V, j_{eq} = Q_{LE}$	$m_\alpha, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w, Q_{LE}, j_{rq}$	λ_{SE}

表 3 主用户离开时系统状态转移表
Table3 States transitions when PU leaves

activity and system channel state	next state	transfer rate
PU_η DP. $j_{eq} = j_{rq} = 0$ or $j_{rq} \neq 0, j_{eq} = 0$. $C_{idle} + \eta < a$ or $j_{eq} = 0, j_{rq} \neq 0, C_{idle} + \eta < V$.	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq}$	μ_p
PU_η DP. $j_{rq} \neq 0, j_{eq} = 0, C_{idle} < a$. $C_{idle} + \eta \geq a j_{rq}$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a + j_{rq}, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, 0$	μ_p
PU_η DP. $j_{rq} \neq 0, j_{eq} = 0$. $C_{idle} < a, a j_{rq} > C_{idle} + \eta \geq a$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a + \left\lfloor \frac{C_{idle} + h}{a} \right\rfloor, j_v, \dots, j_w, j_{eq}, j_{rq} - \left\lfloor \frac{C_{idle} + h}{a} \right\rfloor$	$\left(\left\lfloor \frac{j_{rq}}{\frac{C_{idle} + \eta}{a}} \right\rfloor \right) \mu_p$
PU_η DP. $j_{rq} = 0, j_{eq} \neq 0, C_{idle} < V$. $C_{idle} + \eta \geq j_{eq} W$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a, j_v, \dots, j_w + j_{eq}, 0, j_{rq}$	μ_p
PU_η DP. $j_{rq} = 0, j_{eq} \neq 0, C_{idle} < V$. $j_{eq} W > C_{idle} + \eta \geq j_{eq} V$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a, j_v + j_{eq} - \left(1 + \left\lfloor \frac{C_{idle} + h - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor \right), \dots,$ $j_{\left\lfloor \frac{C_{idle} + h + V - [j_{eq} \cdot V + (W - V) \left\lfloor \frac{C_{idle} + h - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor]} \right\rfloor + 1, \dots, j_w + \left\lfloor \frac{C_{idle} + h - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor, 0, j_{rq}$	$\left(\left\lfloor \frac{j_{eq}}{\frac{C_{idle} + \eta - j_{eq} \cdot V}{W - V}} \right\rfloor \right) \mu_p$
PU_η DP. $j_{rq} = 0, j_{eq} \neq 0, C_{idle} < V$. $j_{eq} V > C_{idle} + \eta \geq V$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a, j_v + \left\lfloor \frac{C_{idle} + h}{V} \right\rfloor, \dots, j_w, j_{eq} - \left\lfloor \frac{C_{idle} + h}{V} \right\rfloor, j_{rq}$	$\left(\left\lfloor \frac{j_{eq}}{\frac{C_{idle} + \eta}{V}} \right\rfloor \right) \mu_p$
PU_η DP. $j_{eq} \neq 0, j_{rq} \neq 0, C_{idle} < V$. $n_E \geq j_{eq} W$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a + \frac{n_R}{a}, j_v, \dots, j_w + j_{eq}, 0, j_{rq} - \frac{n_R}{a}$	$\left(\frac{j_{rq}}{\frac{n_R}{a}} \right) \mu_p$
PU_η DP. $j_{eq} \neq 0, j_{rq} \neq 0, C_{idle} < V$. $j_{eq} W > n_E \geq j_{eq} V$	$m_\alpha, \dots, m_\eta - 1, \dots, m_\beta, g_a + \frac{n_R}{a}, j_v + j_{eq} - \left(1 + \left\lfloor \frac{C_{idle} + h - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor \right), \dots,$ $j_{\left\lfloor \frac{n_E + V - [j_{eq} \cdot V + (W - V) \left\lfloor \frac{n_E - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor]} \right\rfloor + 1, \dots, j_w + \left\lfloor \frac{n_E - j_{eq} \cdot V}{W - V} \right\rfloor, 0, j_{rq} - \frac{n_R}{a}$	$\left(\left\lfloor \frac{j_{eq}}{\frac{n_E - j_{eq} \cdot V}{W - V}} \right\rfloor \right) \cdot \left(\frac{j_{rq}}{\frac{n_R}{a}} \right) \mu_p$

$$p_{b,RSU} = \sum_{\substack{x \in \Omega \\ j_{rq} = Q_{LR}}} \lambda_{SR} \pi(x) \quad , \quad p_{b,ESU} = \sum_{\substack{x \in \Omega \\ j_{eq} = Q_{LE}}} \lambda_{SE} \pi(x) \quad (4)$$

$$p_{f,RSU} = \frac{\sum_{(x, \hat{x}) \in T_{SR}} \pi(x) \gamma_{\hat{x}}^x}{(1 - p_{b,RSU}) \lambda_{SR}} \quad , \quad p_{f,ESU} = \frac{\sum_{(x, \hat{x}) \in T_{SE}} \pi(x) \gamma_{\hat{x}}^x}{(1 - p_{b,ESU}) \lambda_{SE}} \quad (5)$$

式中: $\pi(x)$ 为状态概率; $\gamma_{\hat{x}}^x$ 表示从状态 x 到状态 $\hat{x}$ 的转换率。

$$T_{SE} = \left\{ (x, \hat{x}) = \left[(m_\alpha, \dots, j_{rq}), (\hat{m}_\alpha, \dots, \hat{j}_{rq}) \right] \middle| N_{PU}(\hat{x}) = N_{PU}(x) + 1, \quad N_{ESU}(\hat{x}) < N_{ESU}(x) \right\} \quad (6)$$

$$T_{SR} = \{(x, \hat{x}) = [(m_a, \dots, j_{rq}), (\hat{m}_a, \dots, \hat{j}_{rq})] | N_{PU}(\hat{x}) = N_{PU}(x) + 1, N_{RSU}(\hat{x}) < N_{RSU}(x)\} \quad (7)$$

式中 N_{PU} , N_{ESU} 和 N_{RSU} 分别表示此状态内的用户数量。

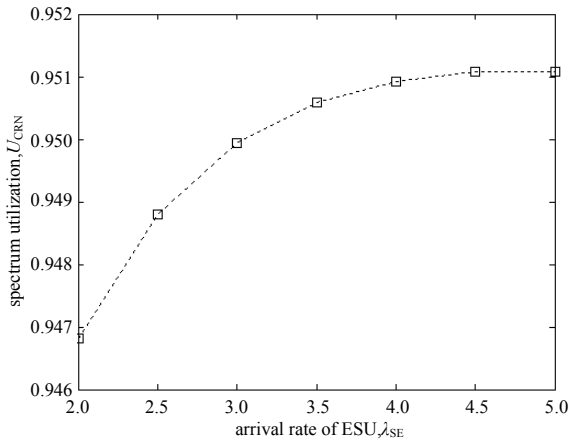


Fig.2 Spectrum utilization as a function of λ_{SE}
图2 频谱利用率随 ESU 到达率的变化

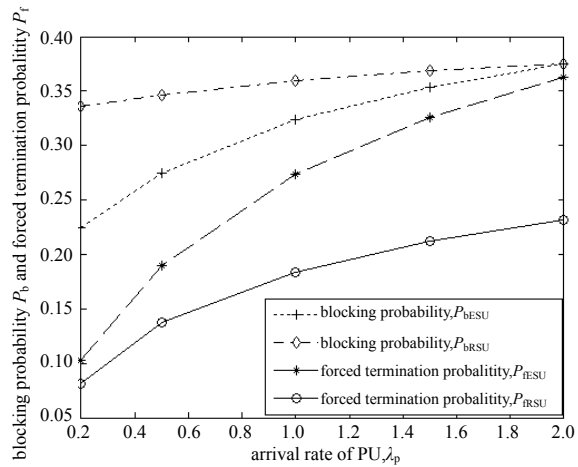


Fig.3 SU blocking probability and dropping probability as functions of λ_p
图3 次用户阻塞率和掉话率随主用户到达率的变化

4 结论

本文讨论了之前文献中所提出的认知无线网络中动态信道接入策略的不足。文中利用了马尔科夫模型、队列模型和频谱聚合技术,首次提出了考虑多带宽需求用户的接入策略,这样更加真实模拟了现实无线网络情形。并利用 MATLAB 对频谱利用率、次用户业务的阻塞率、掉话率进行了模拟仿真和分析。从仿真结果可以看到,这种策略极大提高了网络频谱利用率。但是本文中利用了理想的频谱聚合技术,忽略了用户切换信道时的一些硬件限制。未来研究方向将考虑具有频段限制的频谱切换策略。

参考文献:

- [1] STEVENSON C R, CHOUINARD G, LEI Z, et al. IEEE 802.22 the first cognitive radio wireless regional area network standard[J]. IEEE Commun. Mag., 2009, 47(1):130-138.
- [2] TANG P K, CHEW Y H, ONG L C, et al. Performance of secondary radios in spectrum sharing with prioritized primary access[C]// 2006 Military Communications Conference. Washington, D C:[s.n.]. 2006:1-7.
- [3] JIAO L, LI F Y, PLA V. Modeling and performance analysis of channel assembling in multichannel cognitive radio networks with spectrum adaptation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 11(6):2686-2697.
- [4] BALAPUWADUGE I A M, JIAO L, PLA V, et al. Channel assembling with priority-based queues in cognitive radio networks: strategies and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2):630-645.
- [5] TADAYON N, AISSA S. Modeling and analysis of cognitive radio based IEEE 802.22 wireless regional area networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 14(9):4363-4375.
- [6] YAI CHE H, MAZUMDAR R R, ROSENBERG C. A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2000, 8(5):667-678.
- [7] JIAO L, PLA V, LI F Y. Analysis on channel bonding/aggregation for multi-channel cognitive radio networks[C]// European Wireless Conference. Lucca, Italy:[s.n.]. 2010:468-474.
- [8] HAN W, LI J, TIAN Z, et al. Dynamic sensing strategies for efficient spectrum utilization in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11):3644-3655.

作者简介:



胡丽华(1990-),女,杭州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为认知无线网络.email: huluhua90@126.com.

陈晓光(1964-),男,安徽省五河市人,副教授,硕士生导师,主要研究方向移动无线通信、量子通信。