文章编号：2095-4980(2013)02-0228-06

基于碰撞概率约束的认知系统子信道分配算法

任丙印[1,2]，王大鸣[2]，崔维嘉[2]，胡捍英[2]

(1.63892 部队，河南 洛阳 471000；2.解放军信息工程大学 信息工程学院，河南 郑州 450002)

摘　要：针对如何在保护主用户的同时最大化有效吞吐量的子信道分配问题，考虑由于主用户的重新到来而造成的主次用户碰撞，给出一种基于子信道碰撞概率约束的子信道分配算法。算法通过约束子信道碰撞概率来保护主用户，依据碰撞概率约束估计各子信道可容忍最大传输时长，随后认知用户根据请求业务时长选择合适的子信道接入。仿真结果表明，与不考虑子信道碰撞概率约束的算法相比，该分配算法很好地保护了主用户，且在信道条件较好时，能取得更好的有效吞吐量性能。

关键词：认知无线电；多用户；子载波分配；碰撞概率；有效吞吐量

中图分类号：TN925；TP915.104　　**文献标识码：**A

Subcarrier allocation algorithm of CR system based on collision probability constraints

REN Bing-yin[1,2], WANG Da-ming[2], CUI Wei-jia[2], HU Han-ying[2]

(1.The Army of 63892, Luoyang Henan 471000, China; 2.Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: In order to maximize the effective throughput while protecting the primary user, a subchannel allocation algorithm based on the subchannels collision probability restraints is proposed by considering the collision between primary user and cognitive user caused by primary user's return. The proposed algorithm protects the primary users by constraining the subchannels collision probability, and the maximum transmission delay that each subchannel can tolerate is estimated by the probability of collision restraints. The appropriate subchannel is selected according to the cognitive user's service. Simulation results show that the allocation algorithm can protect the primary users well, and can achieve better throughput performance under better channel conditions, compared to the algorithm without considering the constraints of the subchannel collision probability.

Key words: Cognitive radio; multi-user; subcarrier allocation; collision probability; effective throughout

随着无线与移动通信技术广泛应用，频谱资源的匮乏已经成为制约其高速发展的主要因素。针对当前各国静态分配频谱政策带来的频谱利用率过低问题，认知无线电(Cognitive Radio，CR)[1-2]技术感知频谱空穴，并动态分配频谱，极大地提高了频谱利用率，为解决频谱资源紧缺问题提供了新的思路，受到了广泛的关注与研究。

在周期性频谱感知模型下，认知用户在利用已分配的空闲子载波进行数据传输过程中，由于不能及时检测到主用户的突然到来而导致认知用户与主用户发生碰撞。主次用户发生碰撞，不但会干扰主用户的正常通信(这在认知无线电系统设计中是要极力避免的)，而且导致认知系统业务延迟和数据分组丢失，影响整个系统性能。

目前已经有不少文献开始研究基于主次用户碰撞概率模型下的频谱分配问题。文献[3-5]研究了通过对当前频谱感知结果与历史频谱空闲信息分析，从而预测主用户占用频谱的活动规律，改善频谱接入方案。文献[3-4]部分可观测马氏决策过程(Partially Observable Markov Decision Processes, POMDP)理论选择出当前空闲概率最大的信道进行接入，但其没有考虑信道持续空闲时长对系统碰撞概率的影响。文献[5]首先采用支持向量机的方法

收稿日期：2012-05-14；**修回日期：**2012-06-05

基金项目：国家科技重大专项资助项目(2011ZX03003-003-02,2009ZX03003-007)；国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA011504)

根据历史感知数据拟合出授权频段空闲时长分布的概率密度，计算出各个信道空闲一定时长的概率，然后在此基础上完成动态频谱接入，具有可实现性，但该算法依赖于概率密度估计方法的精确度。文献[6]基于信道预留机制，提出一种新的介质访问控制(Medium Access Control，MAC)层协议，旨在补偿由于主次用户碰撞带来的性能损失。文献[7–8]是在授权频段空闲时长属于指数分布模型下分析动态频谱接入。文献[7]在已知当前业务请求时长前提下，从所有满足此请求时长的空闲信道中，选择空闲概率最大的子信道进行接入。文献[8]提出一种基于跨层优化的机会频谱接入算法，提出有效传输容量的概念，并以最大化有效传输容量为准则，伺机接入空闲频谱。

文献[7–8]虽然很好地控制了碰撞概率，但分析的都是单用户场景下的频谱接入问题，没有考虑多用户时竞争频谱分配问题。本文通过约束子信道的碰撞概率来保护主用户，给出了多用户场景下的认知系统子信道分配算法。算法借鉴有效吞吐量的概念作为子信道分配的优化目标，首先依据各个子信道空闲时长分布参数，在子信道碰撞概率约束下计算各子信道可容忍最大传输时长，在此基础上，根据认知用户业务请求给出一种启发式的次优子信道分配算法。

1　系统模型与问题引入

对于采用 Overlay 频谱共享模型认知无线电系统，认知用户只有在检测到空闲信道时才能利用授权频谱进行数据传输。在理想情况下，感知节点准确检测到空闲信道的出现，并能实时监测主用户的出现，一旦发现主用户重新占用频谱，认知用户立即退出该频谱。因此，主用户和认知用户不会发生碰撞。但事实上，由于非理想感知和感知机制等原因，往往会发生主次用户碰撞的情况。下面分析由于周期性感知引发主次用户碰撞场景，如图 1 所示。

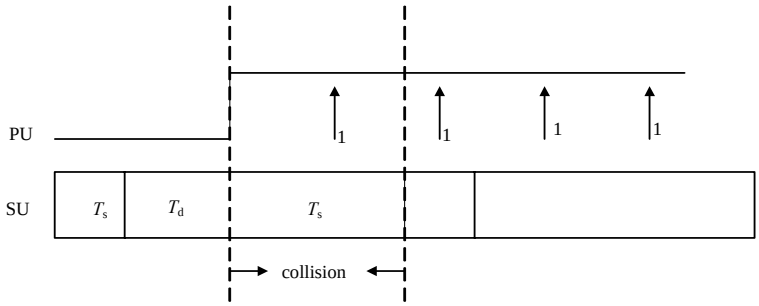

Fig.1 Collision schematic diagram between PU and SU

图 1 主次用户碰撞场景示意图

认知节点由于硬件及资源限制采用周期性频谱感知。认知节点在感知时间 T_s 内检测到主用户频谱处于空闲状态，认知用户利用此频谱进行数据传输，主用户接入频谱具有随机性、瞬时性，在任意时刻都有可能突然到来，如图 1 所示，主用户在认知用户数据传输时间内重新占用频谱，引起主次用户的碰撞，且直到下一个感知周期认知用户检测到主用户的到来才能消除这种碰撞。本文关注在周期性频谱感知模型下，如何根据主用户占用频谱的规律和认知用户业务请求特点，通过合理分配频谱，在对主用户干扰最小化的同时提高认知系统性能。

对于主用户占用授权频段规律的研究，现有研究成果主要分为 2 类：一类是根据授权频谱空闲时长历史数据，用支持向量机等方法估计出概率密度[5]；第二类是基于 ON–OFF 模型的两状态离散时间马尔可夫链模型。其中第二类模型设某一授权频段处于 ON 或 OFF 2 种状态的时间服从指数分布，更具有可操作性，受到广泛的关注[8–10]。本文采用第二类模型来分析主用户占用频谱的活动规律，其两状态马尔可夫链模型如图 2 所示。

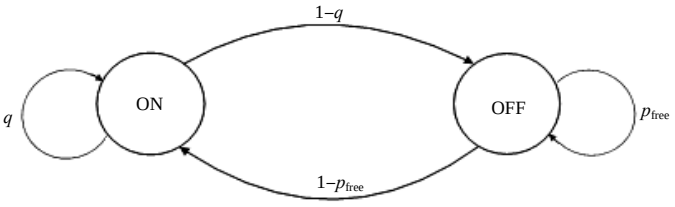

Fig.2 Schematic diagram of two-state Markov chain

图 2 两状态马尔可夫链示意图

设授权频谱空闲时长分布属于指数分布，且各个子信道独立同分布，其参数用 λ_i 表示，则其概率密度函数 $f_i(t)$ 和 $t_i \leqslant l$ 的概率 $p(t_i \leqslant l)$ 分别表示为：

$$f_i(t)=\begin{cases}\lambda_i e^{-\lambda_i t}, & t \geqslant 0 \\ 0, & t < 0\end{cases} \quad (\lambda_i > 0) \tag{1}$$

$$p_i(t \leqslant l) = \int_{-\infty}^{l} f_i(t)\mathrm{d}t = 1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i l} \tag{2}$$

式中 l 指认知用户业务请求时长。

设某一时刻认知用户 m 有一个大小为 R_{req}^m 的数据包需要传输，为其分配单个空闲信道 i，则该认知用户在信道 i 上的业务请求时长为：

$$l_i = \frac{R_{\mathrm{req}}^m}{C} \tag{3}$$

式中 C 为最大传输速率。下面定义子信道碰撞概率来表征子信道 i 上主次用户发生碰撞的概率。

定义 1 子信道碰撞概率 p_c^i：

$$p_c^i = p_i(t \leqslant l_i) = 1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i l_i} \tag{4}$$

即信道 i 空闲时长小于业务请求时长 l_i 的概率。

若认知系统分配给用户 m 多个子信道，则 R_{req}^m 被成功传输的条件是每个子信道上都没有与主用户发生碰撞，即每个子信道上都没有发生碰撞。设占用子信道集合为 w_m，则认知用户 m 的业务被成功传输的概率为：

$$p_{\mathrm{s}}^m = \prod_{i \in w_m} (1 - p_c^i) \tag{5}$$

由式(5)可知，用户业务被成功传输的概率与占用的子信道个数和所占用子信道的空闲规律有关，且需要折衷考虑占用子信道的个数，因为当占用子信道个数增加时，每个子信道上业务请求时长变短，子信道碰撞概率降低；但同时当每个子信道碰撞概率相同时，业务成功传输概率随占用信道个数的增加而降低。

本文采用基于 Overlay 频谱共享模型的集中式认知无线电网络架构，认知网络由一个认知基站和若干个认知用户组成。设某一时刻共有 N 个空闲信道，记为信道 $i, i = 1, 2, \cdots, N$，每个信道 i 带宽为 B，最大传输速率为 C。某一时隙认知系统内共有 M 个认知用户机会接入空闲信道进行通信，记为认知用户 $m, m = 1, 2, \cdots, M$。

认知无线电系统中，由于频谱非授权引发了一系列的问题，其中一个问题便是认知无线电网络吞吐量不能仅仅用子信道容量来衡量。因为主用户对频谱的使用具有优先权，认知用户在使用暂时空闲的信道传输数据时，随时都面临着主用户重新使用授权频谱的情形，而认知用户不得不退出正在使用的频谱。另外，当认知用户不能及时检测到主用户的重新到来时还会发生主次用户的碰撞，使得认知用户所传输的数据仍然无效。文献[11]考虑主用户对认知用户的干扰，提出了有效吞吐量的概念来衡量单位时间内正确接收的数据量。本文沿用这一思想，仍用有效吞吐量指标来描述认知无线电系统性能。

定义 2 认知无线电网络有效吞吐量，指单位时间内认知网络成功传输业务量总量，用 R_{E} 表示：

$$R_{\mathrm{E}} = \frac{1}{T_{\mathrm{total}}} \sum_{m=1}^{M} p_{\mathrm{s}}^m \cdot R_{\mathrm{req}}^m \tag{6}$$

式中 T_{total} 为总观察时间。

主次用户发生碰撞，不但会影响认知用户有效吞吐量，更严重的是还会影响主用户的正常通信，因此，为保护主用户，必须约束子信道碰撞概率至主用户可容忍的范围。本文在子信道碰撞概率约束下以最大化认知系统有效吞吐量为目标，研究多用户场景下的子信道分配算法。目标函数表示为：

$$\begin{cases} \max\limits_{\boldsymbol{A}} R_{\mathrm{E}} = \max\limits_{\boldsymbol{A}} \dfrac{1}{T_{\mathrm{total}}} \sum\limits_{m=1}^{M} p_{\mathrm{s}}^m \cdot R_{\mathrm{req}}^m = \max\limits_{\boldsymbol{A}} \dfrac{1}{T_{\mathrm{total}}} \sum\limits_{m=1}^{M} \prod\limits_{i \in w_m} (1 - p_c^i) \cdot R_{\mathrm{req}}^m \\ \mathrm{s.}t. \\ 0 \leqslant p_c^i \leqslant \sigma \\ \sum\limits_{i=1}^{M} a_{i,m} \leqslant 1 \end{cases} \tag{7}$$

式中：σ 为子信道碰撞概率约束；$a_{i,m} = \begin{cases} 1 & \text{信道}i\text{分配给认知用户}m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 为信道分配指示变量；$\boldsymbol{A}$ 为由 $a_{i,m}$ 组成的分配指示矩阵。第 1 个限制条件为碰撞概率约束条件；第 2 个限制条件约束 1 个子信道只能分给 1 个认知用户，

避免共信道干扰。

式(7)是一个离散非线性整数优化问题，最优解法是遍历搜索。但遍历搜索算法的运算复杂度过高，并且随着认知用户和子信道数的增大，其运算量急剧增大。为降低复杂度，本文给出一种次优的启发式子信道分配算法，依据各子信道可容忍最大传输时长进行子信道的分配。

2　基于子信道碰撞概率约束的子信道分配算法

由定义 1 中式(4)可知，子信道碰撞概率与子信道所隶属的主用户活动规律和认知用户在该子信道上业务请求时长有关。传统算法根据认知用户业务请求选择子信道碰撞概率最小的信道进行接入，但并不能很好地解决多用户系统下多个认知用户竞争使用信道的问题。本文从约束子信道碰撞概率的角度出发，通过估测可容忍最大传输时长研究多用户系统下的子信道分配问题。

设子信道碰撞概率约束为 σ，由式(4)可估测各个子信道在满足 σ 条件下能容忍的最大业务请求时长 t_i：

$$t_i = -\frac{1}{\lambda_i}\ln(1-\sigma) \tag{8}$$

针对认知用户的数据请求，分配到每个子信道上数据传输时长不应超过子信道能容忍的最大业务请求时长，以满足各个子信道碰撞概率约束。

在各用户业务数据请求和信道最大传输速率确定的条件下，由式(7)可知，有效吞吐量由成功传输概率确定。而当认知用户 m 均以碰撞概率 σ 占用多个子信道时，该用户业务被成功传输的概率重写为：

$$p_{\mathrm{s}}^{m} = (1-\sigma)^{n} \tag{9}$$

式中 n 为该用户占用的子信道个数。显然，在这种场景下，占用的信道个数越少，成功传输概率越高。因此，以刚好满足各个子信道碰撞概率约束条件的方式占用信道时，相对于选用多个 t_i 较小的信道，选用尽量少的信道能获得更高的成功传输概率。

下面在子信道碰撞概率约束 σ 下给出最大化有效吞吐量的子信道分配算法流程。

Step1 初始化。

置子信道碰撞概率约束 σ，并根据历史感知结果初始化各子信道空闲时长分布参数 λ_j，认知用户业务请求业务量集合 $R_{\mathrm{req}} = \{R_{\mathrm{req}}^{1}, R_{\mathrm{req}}^{2}, \cdots R_{\mathrm{req}}^{M}\}$。

Step2 由 σ 根据式(8)计算各子信道可容忍最大传输时长 $t = \{t_1, t_2, \cdots, t_N\}$。

Step3 在满足子信道碰撞概率约束条件下，给每个认知用户分配尽量少的子信道。

1) 设 n 为分给每个认知用户的子信道个数。For $n = 1, 2, \cdots, N$；

2) For $m = 1, 2, \cdots, M$，若 m 还未分配任何子信道，则从集合 t 中选出大于 $R_{\mathrm{req}}^{m}/(n \cdot C)$ 的所有子信道，并从中选择 n 个最小的分给用户 m；

3) 更新集合 t，即从集合 t 中剔除已分配的子信道；

4) 直到每个认知用户都分得子信道或 $t = \varnothing$，循环结束。

Step4 若子信道还有剩余，将剩余子信道分给满足碰撞概率约束且有效吞吐量增加最多的认知用户，若不满足碰撞概率约束，或有效吞吐量不增加，则放弃此信道的接入。

其中在 Step3 第 2)小步中，$R_{\mathrm{req}}^{m}/(n \cdot C)$ 代表第 m 个认知用户的业务请求用 n 个子信道传输时所用时间。通过 Step3，首先 n 从 1 开始遍历，并对每一个 n 值，未分配子信道的认知用户寻找满足碰撞概率约束的 n 个子信道。这样使得尽量多的认知用户在满足子信道碰撞概率约束的条件下分得子信道，最大化认知系统有效吞吐量。在 Step4 中，对剩余子信道的分配，同样符合满足子信道碰撞概率约束的条件下最大化系统有效吞吐量的原则。

3　算法性能分析

仿真场景设置为：授权频段的每个时隙内空闲子信道数为 $N = 5$，每个子信道最大传输速率为 200 Kbps。根据文献[11]，各子信道空闲时长指数分布参数 λ 大小量级为 10^{-2} ms^{-1}，为叙述方便，本文用分布强度 $\varpi = 1/\lambda$ 描

述子信道空闲时长分布，各子信道在 ϖ~10ϖ 范围内随机取值，且彼此独立。设定某一时隙内有业务请求的认知用户数为 $M=3$，且认知用户每个时隙所需传输数据业务量在 0.1 Kbit~1 Kbit 范围内均匀分布。设每个时隙长度为 10 ms，总观察时间为 1 s。

为分析本文所提算法性能，本节将其与文献[7]中不考虑碰撞概率约束的子信道分配算法以及遍历搜索算法进行了性能差异的仿真。其中文献[7]中分配算法思想是，对于每个认知用户的业务请求，从所有空闲信道中选出碰撞概率最小的子信道进行接入。遍历搜索算法指在一个子信道只能分配给一个认知用户的条件下搜索所有可能的分配方式中有效吞吐量最大的分配策略。同时，在仿真中给出吞吐量的理论最大值作参考，所谓理论最大值是指在认知用户数据传输结束之前空闲信道上的主用户不会重新占用频谱，即业务成功传输概率为 1。

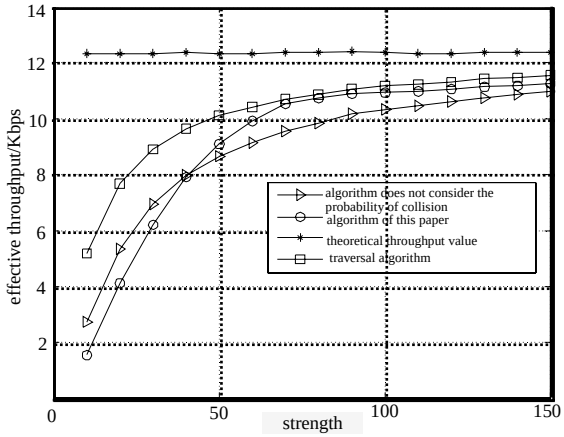

Fig.3 Effective throughput vs. strength
图 3 有效吞吐量随强度变化曲线

实验 1 有效吞吐量与分布强度关系。

图 3 在 $\sigma=0.1$ 的条件下仿真了 3 种算法有效吞吐量随子信道空闲时长分布强度 ϖ 变化的情况。由图中可以看到，3 种算法下有效吞吐量均随 ϖ 的增大而增大，且遍历算法性能最好。本文算法与文献[7]中算法在 $\varpi=40$ 处有一交点，当 $\varpi<40$ 时，本文算法性能不如不考虑碰撞概率约束的算法；而在 $\varpi>40$ 时，本文算法有效吞吐量大于不考虑碰撞概率约束的算法，且接近遍历算法。这是因为，当 ϖ 较小时，各子信道所能容忍的最大传输时长较小，某些子信道因不能满足子信道碰撞概率约束而被放弃使用，而不考虑碰撞概率约束算法则利用所有空闲子信道进行传输，因而有效吞吐量性能要大于本文所提算法。

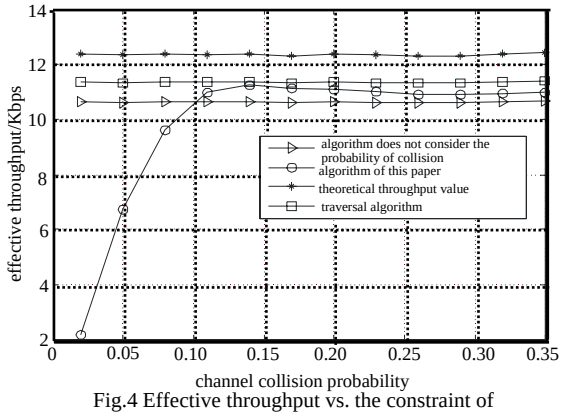

Fig.4 Effective throughput vs. the constraint of sub-channel collision probability
图 4 有效吞吐量随子信道碰撞概率约束变化曲线

实验 2 有效吞吐量与子信道碰撞概率约束关系。

图 4 在 $\varpi=100$ 的条件下仿真了 3 种算法有效吞吐量随子信道碰撞概率约束变化的情况。如图所示，遍历算法和不考虑碰撞概率约束的算法因为与子信道碰撞概率约束无关，因此有效吞吐量变化趋势为 1 条直线。当 $\sigma<0.1$ 时，本文算法随碰撞概率约束的增大而快速增大，并在 $\sigma=0.15$ 时达到最大值，此后随着 σ 的增大，有效吞吐量略有下降，并逐渐趋于稳定，且在 $\sigma<0.1$ 时本文有效吞吐量性能要小于不考虑碰撞概率约束的算法。这是由于当子信道碰撞概率约束较小时，某些子信道被放弃使用而使有效吞吐量较小，某些子信道碰撞概率约束较大时使得约束作用下降，认知用户占用多个子信道而不考虑信道条件差异，使得用户业务成功传输概率下降，导致有效吞吐量略有下降。

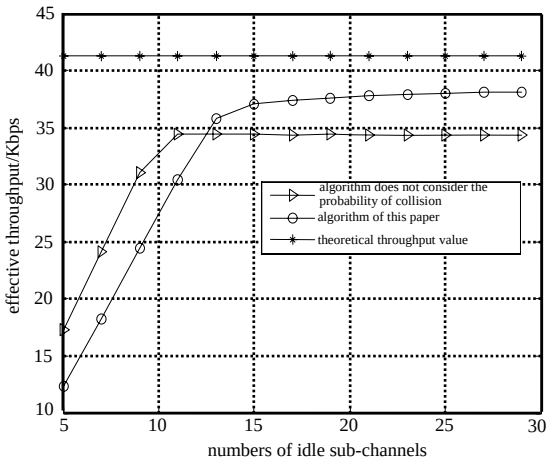

Fig.5 Effective throughput vs. the numbers of idle sub-channels
图 5 有效吞吐量随空闲子信道个数变化曲线

实验 3 有效吞吐量与空闲子信道数关系。

图 5 仿真了有效吞吐量随空闲信道个数变化的情况。仿真条件为：$\varpi=100, \sigma=0.1, M=5$~$10$，其他条件不变。由图中可以看出，2 种算法都随空闲子信道个数的增大而增大，且当 $N>13$ 时本文算法有效吞吐量性能优于不考虑碰撞概率约束的算法。这是因为当空闲子信道个数较少时，会出现某些认知用户占用多个子信道而某些认知用户却得不到子信道的情况，致使有效吞吐量较低。

综合上述 3 个仿真，相对于遍历算法，本文所提算法用一定吞吐量性能的损失换取了复杂度的大大降低，

使算法更具可实现性。相比于不考虑碰撞概率约束的算法，本文算法通过对子信道碰撞概率的约束，很好保护了主用户，且当子信道碰撞概率约束、空闲时长分布强度以及空闲信道个数等条件较为宽松时，本文算法有效吞吐量性能优于对比算法。

4　结论

避免对主用户的干扰是认知无线电系统设计时始终要考虑的问题。但即使感知结果完全理想，由于主用户在认知用户传输时间内有可能突然到来，同样会造成主次用户的碰撞。本文则针对主用户重新到来引起的碰撞问题，从约束子信道碰撞概率的角度来尽量避免主次用户的碰撞，给出最大化有效吞吐量的子信道分配算法。算法首先基于子信道碰撞概率约束，估计出各子信道可容忍最大传输时长，然后根据认知用户的业务请求选择合适的子信道进行接入。仿真结果表明，本文所提算法相对于不考虑碰撞概率约束的分配算法，很好地保护了主用户，且在信道条件较好时，有效吞吐量性能优于对比算法。

参考文献：

[1] Mitola J,Maguire G Q. Cognitive radio:Making software radios more personal[J]. IEEE Pers. Commun, 1999,6(4):13–18.

[2] Haykin S. Cognitive radio:Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2005,23(2):201–220.

[3] 李晓娅,张有光,吴华森. 认知无线电中基于 POMDP 的机会频谱接入算法[J]. 计算机工程与设计, 2011,32(4):1182–1185. (LI Xiaoya,ZHANG Youguang,WU Huasen. Scheme of opportunistic spectrum access based on POMDP in cognitive radio networks[J]. Computer Engineering and Design, 2011,32(4):1182–1185.

[4] 李城鑫,黄玉清,李强. 改进的多用户 OFDM 系统子载波和比特分配算法[J]. 信息与电子工程, 2010,8(6):660–664. (LI Chengxin,HUANG Yuqing,LI Qiang. An improved subcarrier allocation and bit loading algorithm for multiuser OFDM system[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(6):660–664.)

[5] 贺新颖,曾志民. 基于概率密度估计的认知无线电动态频谱接入算法[J]. 北京邮电大学学报, 2009,32(1):108–112. (HE Xinying,ZENG Zhimin. A Dynamic Spectrum Access Algorithm Based on Probability Density Estimation in Cognitive Radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009,32(1):108–112.)

[6] Eljack S,Igbal A,Wang F R. A Multi Channel Cognitive MAC Protocol with Efficient Channel Reservation and Collision Avoidance Method[C]// IEEE International Conference on Multimedia Information Networking and Security. Wu Han:[s.n.], 2009:115–119.

[7] 杜雪莲,杨震,吴迎笑. 一种改进的认知无线电信道选择方法[J]. 南京邮电大学学报, 2010,30(5):47–50. (DU Xuelian, YANG Zhen,WU Yingxiao. An Improved Channel Selection Method of Cognitive Radio[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2010,30(5):47–50.)

[8] 张晶,朱洪波. 基于跨层优化的机会频谱接入算法[J]. 通信学报, 2010,31(11):188–194. (ZHANG Jing,ZHU Hongbo. Opportunistic spectrum access algorithm based on cross-layer optimization[J]. Journal on Communications, 2010,31(11):188–194.)

[9] ZHAO Q C,GERIHOFER S,TONG L,et al. Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008,56(2):785–796.

[10] Li X,Zhao Q C,Guan X H. Optimal Cognitive Access of Markovian Channels under Tight Collision Constraints[J]. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2011,29(4):746–755.

[11] 马志垚,曹志刚. 分布式认知无线电网络用户有效吞吐量的优化[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008,48(4):506–509. (MA Zhiyao,CAO Zhigang. Goodput optimization based on distributed cognitive radio network[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008,48(4):506–509.)

作者简介：

任丙印(1987–)，男，河南省濮阳市人，硕士，主要研究方向为认知无线电频谱分配技术.email:bingjay123@163.com.

胡捍英(1961–)，男，河南省南阳市人，教授，博士生导师，主要研究方向为无线与移动通信.

王大鸣(1971–)，男，辽宁省大连市人，副教授，主要研究方向为第 3 代移动通信系统.

崔维嘉(1976–)，男，辽宁省丹东市人，讲师，主要研究方向为无线与移动通信.