

认知网络中时延最优的频谱决策方法

孙武剑^{1,2}, 李娜¹, 刘洋¹, 孙乐², 陈韬², 李昊³, 李鸥¹

(1.信息工程大学 通信工程系, 河南 郑州 450001; 2.中国北方电子设备研究所, 北京 102209;

3.北京邮电大学 信息与通信工程学院网络体系架构与融合实验室, 北京 100876)

摘要: 针对异构认知网络中频谱管理框架的频谱决策问题展开研究, 综合考虑物理层频谱感知错误和无线信道衰落、主用户的多次打断带来的不利影响, 提出了基于概率的和基于感知的具有负载均衡功能的频谱决策方法。对于基于概率的频谱决策方法, 基于短时业务优先的调度策略采用动态规划方法给出了其平均等待时延的闭式解; 对于基于感知的频谱决策方法, 提出了允许其中断后可以重新搜索可用信道的决策方法, 减少了等待主用户传输的时延, 并在分析比较两者时延的基础上, 提出了一种总体时延最优的频谱决策方法。此外, 将认知网络的异构信道特性考虑分析框架中, 理论分析较具一般性。仿真结果证实了方法的有效性。

关键词: 认知网络; 频谱决策; 感知错误; 驻留时间; 短时业务优先; 抢占式优先级排队论

中图分类号: TP 929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0060-11

Delay-optimal spectrum decision method for cognitive network

SUN Wu-jian^{1,2}, LI Na¹, LIU Yang¹, SUN Le², CHEN Tao², LI Hao³, LI Ou¹

(1. Department of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Institute of North Electronic Equipment, Beijing 102209, China;

3. Network System Architecture and Integration Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Spectrum decision was investigated within the confine of spectrum management framework for cognitive radio networks. Sensing errors in PHY layer, outage probability on wireless channel and multiple interruptions of primary user were taken into consideration. Probability-based and sensing-based spectrum decision methods were proposed, which were capable of balancing traffic evenly among licensed. For the probability-based method, short-time first discipline was employed to further shorten average residual time, closed-formed expression were presented based on dynamical programming. For the sensing based method, new channel could be chosen for uncompleted transmission, which alleviated the time spent in waiting primary user. Optimal residual time was obtained by choosing the minimal value of the two methods. Furthermore, spectrum heterogeneity was taken into consideration and theoretical analysis was of general sense. Simulation results validate the approach is efficient.

Key words: cognitive networks; spectrum decision; sensing error; residual time; short-time job first; PRP queuing

1 引言

一直以来, 广大科技工作者对有效性和可靠性

的不懈追求推动了通信技术的不断发展。利用率提高的方式从最初的多址接入技术如固定多址接入(TDMA、CDMA等), 到后来的随机接入、时隙接

收稿日期: 2012-08-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2009AA01Z207); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009ZX03003)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009 AA01Z207) The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009ZX03003)

入和载波监听多路访问协议 (CSMA), 不断提高的正是资源的利用率。除了多址技术, 同步研究的还有各种编码技术、调制方式等, 都希望进一步地提高频谱资源的利用率。即便如此, 有限的资源仍不能满足无线通信事业快速发展的需要。然而, 频谱的耗尽和利用率似乎不成正比, 大量研究表明, 可用的频谱资源被分配后并没有被合理地利用, 根据美国联邦通信委员会从 2002 年~2010 年之间的 4 项研究报告, 目前, 大部分频段的利用率不超过 15%^[1~4], 面对频谱紧缺与利用率低下的矛盾局面, 学术界提出了认知无线电的概念^[5], 通过感知频谱空白, 在不影响授权用户正常通信的前提下, 实现对频谱空洞的伺机接入。一方面, 频谱的低利用率为认知无线电提供了方案可行性; 另一方面, 市场上已经有带宽超过 2GHz 的射频前端流通, 为认知无线电的实现提供了技术可能性。因此, 有理由相信, 认知无线电是未来缓解频谱稀缺的一个可靠解决方案^[6]。

与传统的无线网络架构不同, 认知网络面临许多新的问题, 如优先级高于认知用户的授权用户服务质量保证、频谱资源的不可靠等, 对认知网络的资源管理提出了新的难题, 因此, 网络的优化目标就必须在保证各项技术指标的前提下实现频谱利用率的提高, 优化问题本身就是一个多目标优化问题^[7]。典型的认知网络体系架构如图 1 所示^[8]。

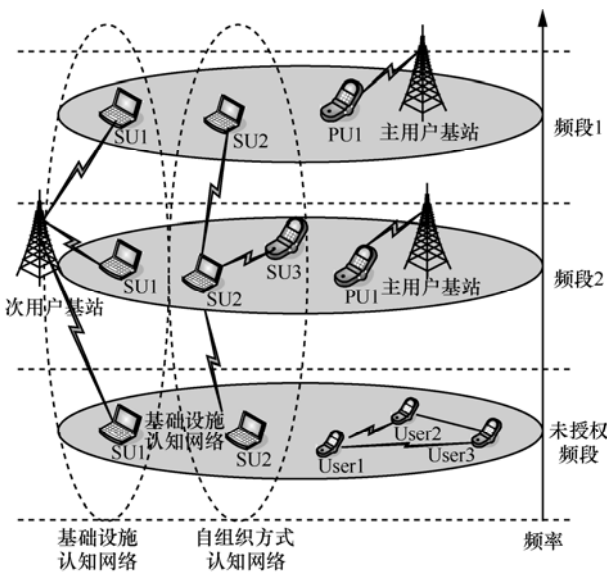


图 1 典型的认知网络体系架构

认知网络的频谱管理技术分为频谱感知、频谱决策、频谱共享和频谱切换, 具体模块与网络分层协议之间的关系如图 2 所示^[9,10]。

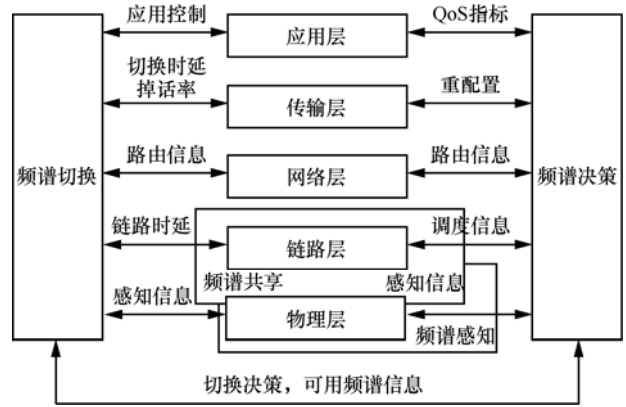


图 2 认知网络的频谱管理框架

基于上述频谱管理技术框架, 次用户接入授权频段可以分为以下 4 步。1) 当次用户需要进行数据传送时, PHY 层频谱感知模块在一段很宽的频段内开始搜索并感知授权频段, 将感知结果形成本地知识库, 建立可用的频谱集合, 向网络协议各层以及频谱管理相关模块提供信息, 当然, 考虑到感知错误的不可避免性, 感知结果只是很大概率上可信, 并且感知错误之间往往存在着互换^[11]。2) 面对感知的结果, 次用户依据某种最优准则, 按照最大化频谱利用率的优化目标选择最优的频谱接入。值得一提的是, 在实现频谱决策时, 如果多个用户按照同一种优化目标进行优化, 则会出现某个“最优”信道业务量非常大, 而其他的次优信道利用率仍然非常低下, 因此非常有必要研究负载均衡意义上的频谱决策。3) 频谱决策时, 如果存在多个认知用户, 必须进行协调接入, 并且要在满足主用户性能指标 (如主用户干扰指标) 和次用户业务要求等的前提下, 尽可能地允许更多的用户协调接入信道, 从而提高频谱资源的利用率。4) 在前述行为正常执行的情况下, 如果没有主用户的存在, 则状态可以持续下去, 但是由于拥有授权信道的主用户可能随时回归, 次用户必须随时准备清空信道, 并保存好通信现场, 以便信道清空后继续未完成的通信任务。以上 4 个过程可以用图 3 表示。



图 3 频谱管理的实现时序

认知网络的频谱决策主要讨论的是设置某种最优准则, 并按照该准则为业务分配信道资源。以次用户的时延指标为例, 假设认知网络中存在多个

可用频谱资源, 并按照信道带宽或忙闲概率等指标降序排列, 则次用户按照时延最优的原则, 首先选择信道带宽最大、空闲概率最大的信道接入, 从而获取最小的传输时延。但是如果所有的次用户都选择使用该决策方法选择信道, 则会使最好的信道业务量过大而引起较大的传输延时, 甚至引起整体性能的恶化。因此, 如何在精确描述并合理分配多个可用频谱资源就变得十分必要。频谱决策就是由这两步构成, 一是频谱的描述, 即按照性能指标或优化准则给出频谱的一个度量值, 二是频谱的分配, 即如何在不同用户和业务间均衡地进行频谱资源分配从而获取最佳的结果。由此可知, 频谱的决策主要依靠的是长期的统计结果(通过获取主用户不占用信道的概率来得到次用户的可用概率), 而不仅仅是传统意义上的短期观察, 如“先听后说”的分布协调功能。在长期统计结果的前提下, 结合当前感知结果, 可以较为合理地实现频谱决策, 如图 4 所示。

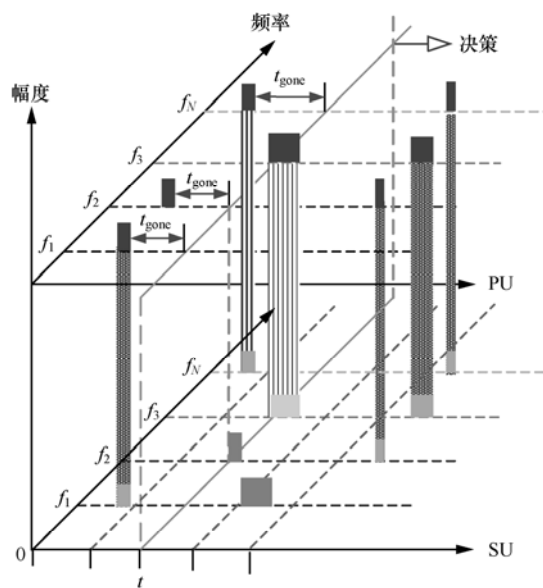


图 4 结合历史统计信息和当前感知结果的负载均衡频谱决策方法

认知网络的频谱决策首先在文献[10]中被提出之后, 文献[12]提出了一种基于负载均衡的频谱决策方法, 将性能指标定义为最小化次用户在系统中的驻留时间, 文献[13]提出了一种以最优吞吐量及最小化时延抖动为目标的频谱决策方法, 文献[14]基于抢占恢复式优先级排队论对次用户的时延性

能进行了研究。文献[15]通过随机微分方程研究了动态频谱决策问题, 提出了一种基于频谱经纪人的分析框架, 实现了非协作的纳什均衡。文献[16]对 Overlay 模式下的频谱决策进行了研究, 提出了基于预测的决策策略, 并使用排队论进行了性能分析。文献[17]基于特征的信号检测和分类算法提出了一个频谱决策框架, 并在 QoS 性能指标约束下最大化了信道利用率。此外, 文献[18~20]分别以信道负载流量、空闲概率以及平均等待时间作为决策指标。但是上述文献几乎都没有考虑认知网络的异构特性, 几乎一致假设信道是独立的, 带宽也是相同的。此外, 对于被中断的用户, 没有考虑频谱切换, 而是等待信道变为空闲再接入, 这也不是一种优化的决策。本文综合对比了上述文献的优点和不足, 提出了一种时延最优的频谱决策方法, 重点研究了基于概率和基于感知的频谱决策方法, 使用抢占式优先级排队模型对基于概率的决策进行了理论分析, 采用了短时业务优先的调度策略, 在研究基于感知的频谱决策方法时, 重点研究了碰撞后可以切换频谱的决策方法。本文提出的决策方法考虑到认知网络的异构特性, 并且考虑了次用户的感知错误和无线链路的衰落特性, 将次用户业务到达均衡地分配到各个信道上, 优化的目标是 minimized 次用户分组的驻留时延。本文的主要贡献归纳如下:

- 1) 基于概率的异构网络频谱决策方法;
- 2) 基于短时业务优先的抢占恢复式优先级排队模型;
- 3) 基于感知的冲突后可切换信道决策方法;
- 4) 时延最优的异构认知网络混合频谱决策方法;
- 5) 考虑到感知错误和无线信道衰落特性的时延最优决策方法。

2 网络模型

考虑一种有中心的时隙认知网络, 如图 1 中的左侧所示。由数量固定的主用户和数量不定的次用户组成, 所有到达的业务分组都必须在下一个时隙的开始尝试发送。假设系统处于稳定状态, 中心设备掌握主用户的稳态运行规律(平均信道占用率, 也可以通过统计规律得到)和次用户的分组长度信息, 并假设所有的用户(主用户和次用户)都已经严格同步, 主用户对信道享有优先权, 次用户可以在主用户离开信道时伺机利用信道, 优先级的实现

方法是：在时隙开始的一个极短的时间内，次用户感知信道，如果没有主用户接入，则在感知时间结束后接入信道，如果主用户分组队列不为空，则在时隙的开始就会占用信道，所以实现了优先级分类。本文假定次用户的射频前端能检测出全部主用户的信道，但是由于感知错误的存在，有可能出现主用户正在通信却被次用户判断为信道空闲（漏检），那么主用户和次用户的通信都将失败，主用户在此信道上尝试重传，而次用户可以选择继续等待，也可以选择切换，关于继续等待何时进行切换的选择问题，则不属于本文的范畴，将在以后的研究中给出（需要兼顾概率、主用户要求、次用户约束和带宽等），本文选择切换。

2.1 符号定义

假设认知网络中主用户个数为 M ，主用户和次用

$$CN = \begin{bmatrix} \lambda_1 & X_{P,1} & f_1(x) & X_{S,1} & \dot{X}_{P,1} & \dot{X}_{S,1} & E(X_{P,1}) & E(X_{S,1}) & E(\dot{X}_{P,1}) & E(\dot{X}_{S,1}) \\ \lambda_2 & X_{P,2} & f_2(x) & X_{S,2} & \dot{X}_{P,2} & \dot{X}_{S,2} & E(X_{P,2}) & E(X_{S,2}) & E(\dot{X}_{P,2}) & E(\dot{X}_{S,2}) \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ \lambda_M & X_{P,M} & f_M(x) & X_{S,M} & \dot{X}_{P,M} & \dot{X}_{S,M} & E(X_{P,M}) & E(X_{S,M}) & E(\dot{X}_{P,M}) & E(\dot{X}_{S,M}) \end{bmatrix}$$

最后，假设次用户业务的传输时延的概率密度函数为 $f_s(x)$ 。

2.2 模型建立

图 5 给出了本文提出的认知网络频谱决策模型。 M 个主用户所占用的信道构成了认知网络的信道资源，当次用户到达认知网络后，可以从 M 个信道中选取任意一个接入，本文的研究目标就是合理分配这些次用户，使次用户的平均驻留时间最小。如前述，为了不产生某些信道不必要的流量拥挤和其他信道资源浪费，借鉴文献[21~25]中采用的负载均衡方法，即把所有到达的次用户请求排成一队，并按照概率分配至各个信道，记概率分配向量为 $\vec{P} = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ ，则 $\sum_{1 \leq i \leq M} p_i = 1$ 。至此，本文的优化目标就是寻找最优的概率向量，使系统的平均驻留时间最小。

3 理论分析

3.1 问题的形式化描述

如文献[6,7,13,14]所述，次用户在系统中的平均驻留时延是衡量认知网络的一个重要的性能指标，也是 IEEE 802.22 工作组设置的度量标准之一[26,27]。

户（合成或汇聚业务流）的到达速率参数为 $\lambda_i, 1 \leq i \leq M$ 和 λ_s 的泊松过程，信道的带宽固定但不相等，分别记为 $B_i, 1 \leq i \leq M$ ，分组业务的长度（随机变量）设为 $L_i, 1 \leq i \leq M$ 和 L_s ，则分组的传输时延（随机变量）为 $X_{P,i}, 1 \leq i \leq M$ 和 $X_{S,i}, 1 \leq i \leq M$ ，且有

$$X_{P,i} = \frac{L_i}{B_i}, 1 \leq i \leq M$$

$$X_{S,i} = \frac{L_s}{B_i}, 1 \leq i \leq M$$

此外，假设 $X_{P,i}, 1 \leq i \leq M$ 具有概率密度函数 $f_i(x), 1 \leq i \leq M$ 。考虑到感知错误及无线信道衰落特性的影响，主用户和次用户的传输时延都有可能扩展为 $\dot{X}_{P,i}, 1 \leq i \leq M$ 和 $\dot{X}_{S,i}, 1 \leq i \leq M$ 。因此，一个认知网络的参数可以用如下矩阵表示

本文也是对该时间指标进行量化分析。对于次用户来说，平均驻留时间等于传输请求在网络中的平均等待时间加上业务的平均传输时间（考虑到感知错误、主用户中断以及无线信道衰落带来的不利影响情况下的总传输时间）。因此有

$$E(T) = E(W) + E(\dot{X}_s) \tag{1}$$

其中， $E(\cdot)$ 是随机变量的期望函数。这里的平均等待时间是指从次用户到达系统那一时刻到接受服务在队列中所花费等待时间的均值。

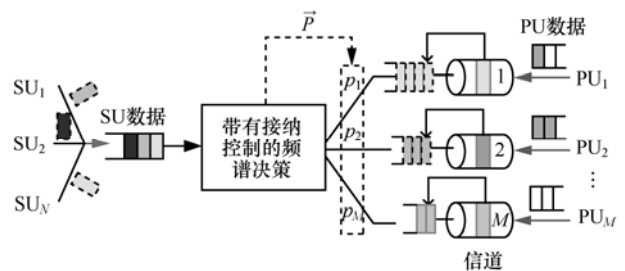


图 5 频谱决策模型

3.2 基于概率的频谱决策方法

目前，基于概率的频谱决策方法主要是为了均衡负载采取的“分流”策略，即所有次用户在统计特性已知的情况下，按照预先定好的概率分配向

量, 将到达任务按照时延最优的原则分配给不同的信道, 优化的目标是获取最优的概率分配向量, 使次用户的平均驻留时间最小, 即

$$\hat{P}^* = \arg \min_{\forall P} E(T_{Pr}) = \arg \min_{\forall P} \{E(W_{Pr}) + E(X_S^{Pr})\} \quad (2)$$

其中, $E(T_{Pr}) = E(W_{Pr}) + E(X_S^{Pr})$ 表示基于概率的频谱决策方法的平均驻留时延。上述优化目标的约束条件为

$$\sum_{1 \leq i \leq M} p_i = 1 \quad (3)$$

$$\rho = \rho_{P,i} + \rho_{S,i} < 1, 1 \leq i \leq M \quad (4)$$

其中, $\rho_{P,i}, \rho_{S,i}$ 分别表示每个信道上固有主用户引入的负载强度和按照事先设定的概率分配向量分流过来的负载强度, 从排队论的角度说, 这两者就是频谱资源的利用率^[28], 因此式 (4) 也即排队系统的稳定性成立。

3.2.1 基于概率的频谱决策方法平均驻留时间计算第一部分: $E(W_{Pr})$

对于基于概率的频谱决策方法, 可以建立排队系统模型。主用户是信道的授权用户, 具有较高的优先级, 次用户作为访问者, 只能在信道空闲时伺机接入信道, 当主用户返回时, 必须立刻清空信道。文献[13]中基于先到先服务的排队策略, 使用抢占式优先级排队模型给出了基于概率的频谱决策方法中次用户在系统中的平均驻留时间。本文基于短时业务优先的策略, 使用动态规划的方法给出了分析结果。本文的分析方法不同于一般的短时优先推导过程, 而是采用认知用户划分多个优先级的方法进行一般化, 从而获取短时业务优先的推导结果。具体思路是: 在主用户已经具有优先级的情况下, 将认知用户进一步划分优先级^[19], 从优先级为 2 个开始, 扩展为 N 个, 最后令 $N \rightarrow \infty$ 得到一般结果。下面逐一推导。

首先给定任意一个划分时间区间的序列, 不妨记为间隔序列 $\{x_i\}_{i=1}^N$, 满足 $0 \leq x_1 \leq x_2 \leq L \leq x_N \leq \infty$ 。短时业务优先的优先级描述是如果一个新到达的次用户的服务时间 (这个数值可以通过认知网络的次用户基站或控制中心获取) 落在 $(x_i, x_{i+1}]$ 内, 那么对于任意 $i < j$, 都会比落在 $(x_j, x_{j+1}]$ 内提前发送。其目标是, 如何划分这些点, 才能使得决策目标也即系统的平均驻留时间最短。根据抢占恢复式优先级排队结论, 如果存在多优先

级, 则各个优先级顾客 (次用户) 的平均等待时间为^[28]

$$E(W_j^P) = \frac{\sum_{i=1}^P \lambda_i \bar{X}_i^2}{2(1 - \sum_{i=1}^j \rho_i)(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \rho_i)} \quad (5)$$

式(5)中对 ρ_i 的求和表示了所有次用户的各个优先级业务的负载求和 (包括主用户)。定义各种业务分类中不同优先级业务所占的比例为

$$\alpha_i = \alpha(x_{i-1}, x_i) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f_S(x) dx, i = 1, 2, L, N \quad (6)$$

则每一类优先级业务的服务强度 (也即信道占用率) 对全部信道占用概率的贡献量为

$$\begin{aligned} \rho(x_i) &= \sum_{k=1}^i \lambda \int_{x_{k-1}}^{x_k} f_S(x) dx \\ &= \lambda \left(\int_0^{x_1} + \int_{x_1}^{x_2} + L + \int_{x_{N-1}}^{x_N} \right) f_S(x) dx \\ &= \lambda \int_0^{x_i} f_S(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

将式 (7) 代入式 (5), 可得

$$E(W_j) = \frac{\lambda_p \bar{X}_p^2 + \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i \bar{X}_S^2}{2[1 - \rho(x_{j-1})][1 - \rho(x_j)]}, j = 1, 2, L, (N+1) \quad (8)$$

将各类优先级次用户的平均等待时间与相应的概率进行求和相加, 得到平均等待时间为

$$\begin{aligned} E(W_{Pr}) &= \sum_{k=1}^{N+1} E(W_k) P_k \\ &= (\lambda_p \bar{X}_p^2 + \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i \bar{X}_S^2) \sum_{k=1}^{N+1} \frac{\alpha(x_{k-1}, x_k)}{2[1 - \rho(x_{j-1})][1 - \rho(x_j)]} \\ &= (\lambda_p \bar{X}_p^2 + \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i \bar{X}_S^2) \sum_{k=1}^{N+1} \frac{\alpha_k}{2[1 - \rho(x_{j-1})][1 - \rho(x_j)]} \\ &= E(R) \sum_{k=1}^{N+1} \frac{\alpha_k}{[1 - \rho(x_{j-1})][1 - \rho(x_j)]}, i = 1, 2, L, M \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $E(R) = (\lambda_p \bar{X}_p^2 + \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i \bar{X}_S^2) / 2 = \lambda_p \bar{X}_p^2 + \lambda_S \bar{X}_S^2$ 表示任意时刻, 新到达的次用户观察到的正在接受服务的用户 (可能是主用户也可能是次用户) 的剩余传输时间的平均值^[30]。从 $E(R)$ 的表达式可以看出, 不管次用户划分了多少个优先级, 也即对于任意选择的间隔序列 $\{x_i\}_{i=1}^N$, 其表达式保持不变。因此, 优化的目标转化为

$$\min\left\{\sum_{k=1}^{N+1} \frac{\alpha_k}{[1-\rho(x_{j-1})][1-\rho(x_j)]}\right\} \quad (10)$$

约束条件为 $1-\rho(x_{j-1})>0, 1-\rho(x_j)>0$ 。带着这个优化目标，可以将上述问题转换为动态优化问题^[31]。首先，当 $k=2$ 时，设 $f_2(x) = \min_{0 \leq y \leq x} g_1(y, x) = g_1(\sigma_1^*, x)$ 。

$$g_1(y, x) = \frac{\alpha(0, y)}{1-\rho(y)} + \frac{\alpha(y, x)}{[1-\rho(y)][1-\rho(x)]} \quad (11)$$

由于 $g_1(x, x) = f_1(x)$ ，所以有 $f_1(x) \geq f_2(x)$ ，如果 $\int_0^y f_s(t)dt > 0, \int_y^x f_s(t)dt > 0$ ，那么可以证明 $g_1(y, x) < f_1(x)$ ，否则 $g_1(y, x) = f_1(x)$ 。

此时，定义： $u_1(x) = 1 + \lambda x \int_0^x f_s(x)dx - \rho(x)$ 和 顾客剩余服务时间在 $(0, x)$ 内的条件期望 $v(x) = \frac{\int_0^x t f_s(t)dt}{\int_0^x f_s(t)dt} = \frac{\rho(x)}{\lambda \int_0^x f_s(t)dt}$ 。则 $\sigma_1^* = u_1(\sigma_1^*)v(x)$ 。至此，

对于概率密度已知的次用户分组，通过求解 σ_1^* 可以得到最优的分类点。对于文中假设的次用户的 M/G/1 排队模型，已知到达速率为 λ_s ，为了简化计算给出一个实例，假设 G 满足指数分布，其概率密度函数为 $f(x) = \frac{1}{\mu} \exp(-\frac{x}{\mu})$ ，次用户到达速率为 λ_s ，则最佳的分类点是 $\phi\mu$ ，其中， ϕ 满足

$$\frac{1}{\mu} = \lambda_s + \frac{e^{-\phi}}{\phi - 1} \quad (12)$$

对于一般的 k 类问题，可以表示为

$$f_{k+1}(x) = \min_{0 \leq y \leq x} g_k(y, x) \quad (13)$$

如前述，令 σ_k^* 为 y 的最小值，由如下方程给出

$$\frac{dg_k(y, x)}{dy} = 0 \quad (14)$$

定义 $v(y, x)$ 满足

$$\frac{d}{dy} \left\{ \frac{\alpha(y, x)}{[1-\rho(y)][1-\rho(x)]} \right\} = -\frac{f_s(y)}{[1-\rho(y)]^2} \cdot v(y, x) \quad (15)$$

则

$$v(y, x) = \frac{1-\rho(y) - \lambda y \int_y^x f_s(t)dt}{1-\rho(x)} \quad (16)$$

可以得到

$$\frac{df_k(y)}{dy} = \frac{f_s(y)}{[1-\rho(y)]^2} \cdot v(y, x) \quad (17)$$

继续可得

$$f_k(x) = f_{k-1}([\sigma_{k-1}^*(x)]) + \frac{\alpha[\sigma_{k-1}^*(x), x]}{\{1-\rho([\sigma_{k-1}^*(x)])\} \{1-\rho(x)\}} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} f_k(x) &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\alpha[\sigma_{k-1}^*(x), x]}{\{1-\rho([\sigma_{k-1}^*(x)])\} \{1-\rho(x)\}} \right\} \\ &= \frac{f(x)}{[1-\rho(x)]^2} v[x, \sigma_{k-1}^*(x)] \end{aligned} \quad (19)$$

由于 $\sigma_{k-1}^*(x)$ 是方程可以求出所有 $k-1$ 的分割点，且对于任意的函数 $\phi(x, y)$ ，如果满足 $\phi(x, y) = -\phi(y, x)$ ，则易知

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = -\frac{\partial}{\partial y} \phi(y, x) \quad (20)$$

所以，结合式(17)和式(18)可以看出 σ_k^* 可以通过下式求得。

$$v[x, \sigma_{k-1}^*(x)] - v(y, x) = 0 \quad (21)$$

由 $\sigma_{k-1}^*(x)$ 已知，结合式(20)，可以通过计算各个 $\sigma_k^*(x)$ 。至此，可以计算从 σ_1^* 到 σ_k^* 的各个点的值。

如果 k 足够大，上述多个优先级问题就变为无穷多优先级问题，对于到达任意时间的次用户都能放置到适当的优先级当中，整个问题变成了短时业务优先问题。换言之，如果优先级划分足够多，则每一次接受服务都从等待队列中选取具有最短服务时间（如分组长短最短）的次用户接受服务。对于 $f_k(x)$ 的渐进特性，设当 $k \rightarrow \infty$ 时 $f_k(x)$ 的极限为 $f(x)$ ^[29]，则 $f(x)$ 满足

$$f(x) = \min \left\{ f(y) + \frac{\alpha(y, x)}{[1-\rho(x)][1-\rho(y)]} \right\} \quad (22)$$

其中， y 满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} v[y, \sigma_{k-1}^*(y)] - v(y, x) = 0$ ，易知其解就是 $y = x$ 。换言之，每次接受服务的次用户都是具有最小服务时间的次用户，因此，多优先级（无穷多个）排队系统转变为短时业务优先排队系统。

结论正是说明，每次都选择服务时间最短的次用户进行传输，则总的驻留时间会最小。

令 $\min E(W_i) = CE(R)$ ，则上述问题的结论为

$$E(W_{Pr}) = \sum_{i=1}^M p_i E(W_i) = \sum_{i=1}^M p_i CE(R) \quad (23)$$

此外，如果考虑计算量或者计算强度，可以采用接纳控制机制，即通过一定的控制方法使系统的队列长度控制在一定的范围内，比如设为 K ，从而将优先级个数划分为 K 个，当系统中次用户个数超过 K 个时就拒绝接纳，转而由基础设施缓存，等队列中总人数小于 K 再允许进入。然而这必将引入更多的等待延时，具体研究内容将在以后开展。

3.2.2 基于概率的频谱决策方法平均驻留时间计算第二部分： $E(X_S^{Pr})$

记 P_M 和 P_F 为认知用户的漏检和虚警感知错误概率，同时记 P_{OUT} 为无线信道上因为衰落引起的中断概率。接下来考虑 $E(X_S^{Pr})$ 的计算方法，参考文献[32]可知

$$E(X_S^{Pr}) = \frac{E(X_S)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})[1-P_{PC}]} = \frac{E(X_S)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})[1-(1-P_0)P_M P(L_S=0)]} \quad (24)$$

其中， P_{PC} 表示由于漏检导致的次用户与主用户发生碰撞的概率， $P(L_S=0)$ 表示系统中次用户队列中没有业务等待服务的概率，限于篇幅，不再推导，详见文献[29,30]。

3.2.3 基于概率的频谱决策方法

结合式 (2)、式 (23)、式 (24) 可知基于概率负载均衡方法的最优概率分配向量为

$$\vec{P}_{Pr} = \min_{\vec{P}} \{E(T_{Pr})\} = \min_{\vec{P}} \left\{ \sum_{i=1}^M p_i E(R) f_{N+2}^i(\infty) + \frac{E(X_S)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})[1-(1-P_0)P_M P(L_S=0)]} \right\} \quad (25)$$

约束条件为： $\rho = \rho_{P,i} + \rho_{S,i} < 1, 1 \leq i \leq M$ ，

$$\sum_{1 \leq i \leq M} p_i = 1。$$

3.3 基于感知的频谱决策方法

与基于预先设置概率分配向量的基于概率频谱决策方法不同的是，基于感知的频谱决策方法通过对所有频段的扫描和感知来决定接入信道，假设每个信道的检测时间均为 τ ，也即在每个时隙的开始长为 τ 的时间内，次用户感知信道以获取各个

信道的信息，通过频谱决策方法选择接入，如图 6 所示。

参考 3.1 节中的分析方法可得基于感知的频谱决策方法为

$$E(T_{Sens}) = E(W_{Sens}) + E(X_S^{Sens}) \quad (26)$$

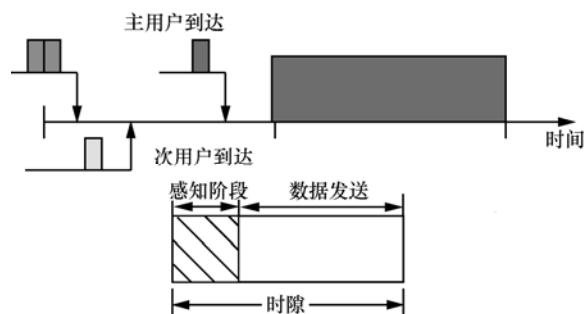


图 6 基于感知的频谱接入方法

3.3.1 基于感知的频谱决策方法平均驻留时间计算第一部分： $E(W_{Sens})$

通过全频段检测 (M 个主用户信道)，如果检测出来有一个闲的信道，则选择接入，如果检测出来不止一个信道，则选择最优的信道接入，如果所有的信道都忙，则仍然选择最优的那个信道，等待其传输完成后接入信道。所谓某个信道最优就是指该信道具有较大的带宽和较小的信道利用率（主用户加载在信道上的业务负载），而这些信息也可以通过基础设施获取。基于上述理解，定义每个信道的可用度为

$$A_i = \frac{B_i}{\rho_i}, 1 \leq i \leq M \quad (27)$$

假设所有的信道都已按照可用度降序排列，即对于 $\forall i > j, A_i \leq A_j$ 。本文提出的接入算法是：如果只有一个信道空闲，则选取该信道接入；如果有大于等于 2 个，则选取可用度较大的信道接入；如果所有信道都忙，则仍然选取最优信道接入。此处，需要计算的概率是在任意时刻忙闲信道的概率分布，也即计算在总数为 M 个信道中，有 k 个信道空闲的概率，每个信道的忙闲概率各不相同，分别为 $\rho_i, 1 \leq i \leq M$ 和 $1 - \rho_i, 1 \leq i \leq M$ ，因此将这个一般意义上的二项分布记为

$$P_k = \sum_{c=1}^{C_k^M} [\prod_{i \in S_c^k} (1 - \rho_i) \prod_{j \in \{\Omega - S_c^k\}} \rho_j], 1 \leq i, j \leq M \quad (28)$$

其中， $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ ， $S_1^k = \{1, 2, \dots, k\}$ ， $S_2^k = \{1,$

2, L, k}, 1 ≤ k ≤ M, C_M^k = $\frac{M!}{k!(M-k)!}$ 。综上所述,

基于感知的频谱决策方法次用户驻留时间的平均值为

$$E(W_{Sens}) = \sum_{k=1}^M kP_k = \sum_{k=1}^M k \sum_{c=1}^{C_M^k} [\prod_{i \in S_c^k} (1-\rho_i) \prod_{j \in \{\Omega - S_c^k\}} \rho_j]$$

$$= \sum_{k=1}^M \sum_{c=1}^{C_M^k} k [\prod_{i \in S_c^k} (1-\rho_i) \prod_{j \in \{\Omega - S_c^k\}} \rho_j] \quad (29)$$

3.3.2 基于感知的频谱决策方法平均驻留时间计算第二部分: E(X_S^{Sens})

由于采用了不同于文献[13]中的冲突后继续等待主用户完成数据传输后再继续的方法, 在计算虚警、漏检和中断概率引起的时延扩展时, 需要将漏检单独计算。首先计算由虚警和中断概率引起的时延扩展, 记为 E(X_{S-P_F, P_{OUT}}^{Sens}), 则

$$E(X_{S-P_F, P_{OUT}}^{Sens}) = \frac{E(X_s)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})} \quad (30)$$

下面计算由于漏检引起的冲突而产生的时延扩展。与基于感知的平均驻留时间第二部分计算方法不同的是, 基于感知的次用户由于漏检发生冲突后可以选取信道可用度更大的信道接入(当然也可能重新选回到本信道)。因此, 在次用户传输数据过程中, 每次发生冲突后由重新搜索引起的时延扩展为

$$P(T_{search} = k) = \begin{cases} 1 - \rho_1 + [1 - \rho_1 - \sum_{n=1}^M (1 - \rho_n) \prod_{i=1}^{n-1} \rho_i] \\ (1 - \rho_k) \prod_{i=1}^{k-1} \rho_i, k = 2, 3, L, M \end{cases} \quad (31)$$

易知, 冲突后所需的平均搜索时延为

$$E(T_{search}) = \sum_{i=1}^M kP(X = k)$$

$$= (1 - \rho_1)\tau + (M - 1)\tau[1 - \rho_1 - \sum_{n=1}^M (1 - \rho_n) \prod_{i=1}^{n-1} \rho_i] + \sum_{k=2}^{M-1} (1 - \rho_k)k\tau \prod_{i=1}^{k-1} \rho_i \quad (32)$$

文献[19]指出, 在次用户传输时间内, 发生冲突的平均次数为

$$E(N_i) = \lambda_i E(X_s) \quad (33)$$

根据先前假设, 冲突发生的概率为: P_{PC} = 1 - (1 - P₀) P_M P(L_S = 0), 综合式 (24) 和式 (25) 可知

$$E(X_{Sens-P_M}^S) = \frac{[(1 - \rho_1)\tau + (M - 1)\tau] \lambda_i E(X_s)}{1 - (1 - P_0) P_M P(L_S = 0)}$$

$$[1 - \rho_1 - \sum_{n=1}^M (1 - \rho_n) \prod_{i=1}^{n-1} \rho_i] + \sum_{k=2}^{M-1} (1 - \rho_k)k\tau \prod_{i=1}^{k-1} \rho_i \quad (34)$$

结合式 (24) 和式 (28) 可得

$$E(X_S^{Sens}) = E(X_{Sens-P_M}^S) + E(X_{S-P_F, P_{OUT}}^{Sens})$$

$$= \frac{E(X_s)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})} + \frac{[(1-\rho_1)\tau + (M-1)\tau] \lambda_i E(X_s)}{1 - (1 - P_0) P_M P(L_S = 0)}$$

$$\{[1 - \rho_1 - \sum_{n=1}^M (1 - \rho_n) \prod_{i=1}^{n-1} \rho_i] + \sum_{k=2}^{M-1} (1 - \rho_k)k\tau \prod_{i=1}^{k-1} \rho_i\} \quad (35)$$

3.3.3 基于感知的频谱决策方法

因此, 本文基于感知的信道决策最小平均驻留时间为

$$E(T_{Sens}) = E(W_{Sens}) + E(X_S^{Sens})$$

$$= \sum_{k=1}^M \sum_{c=1}^{C_M^k} k [\prod_{i \in S_c^k} (1-\rho_i) \prod_{j \in \{\Omega - S_c^k\}} \rho_j] + \frac{E(X_s)}{(1-P_F)(1-P_{OUT})} + \frac{[(1-\rho_1)\tau + (M-1)\tau] \lambda_{p,i} E(X_s)}{1 - (1 - P_0) P_M P(L_S = 0)}$$

$$\{[1 - \rho_1 - \sum_{n=1}^M (1 - \rho_n) \prod_{i=1}^{n-1} \rho_i] + \sum_{k=2}^{M-1} (1 - \rho_k)k\tau \prod_{i=1}^{k-1} \rho_i\} \quad (36)$$

3.4 时延最优的频谱决策方法

综合 3.2 节~3.3 节的分析, 易知最短的分组驻留时间为

$$E(T) = \min \{E(T_{Pr}), E(T_{Sens})\} \quad (37)$$

如果式(37)中的最小值为基于概率的频谱决策方法相对应的那个延时记为 E(T_{Pr}^{*}), 则相对应的概率分配向量为

$$\mathbf{P}^* = \vec{\mathbf{P}}_{Pr} = \min_{\forall \vec{\mathbf{P}}} \{E(T_{Pr}^*)\} \quad (38)$$

4 仿真

经过第 3 节的理论分析, 笔者用数值结果验证频谱决策方法。数值仿真基于 MATLAB 实现, 结合 IEEE 802.22 标准, 设置了一个由 3 个主用户和多个次用户组成的认知网络仿真环境, 具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真环境参数设置

参数	数值
λ _{P,1}	0.01
λ _{P,2}	0.015
λ _{P,3}	0.2
λ _S	0.015
τ	2ms
Slot	10ms

P_F	0.10
P_M	0.10
P_{OUT}	0.10
$E(X_{P,1})$	20
$E(X_{P,2})$	25
$E(X_{P,3})$	30
$E(X_S)$	25

首先仿真了基于概率的频谱决策方法，通过短时业务优先优化次用户的系统驻留时间。图 7 给出了理想情况下，次用户业务流在 3 个信道上的分配概率。由图 7 可知，当次用户业务量较小时，信道 1 作为业务量最小的信道最受青睐，所有业务都将叠加在该信道上。但随着次用户业务量的增加，当业务量增大至 0.08 时，概率分配向量为 $\hat{P} = [0.501, 0.317, 0.182]$ ，即只有大约一半的业务量被分配到信道 1 上，另一半的业务量被调度到信道 2 和 3 上，其中，约有 32% 左右的业务量在信道 2 上，剩下的约 18% 的业务量被调度到信道 3 上，体现了算法的负载均衡特性。

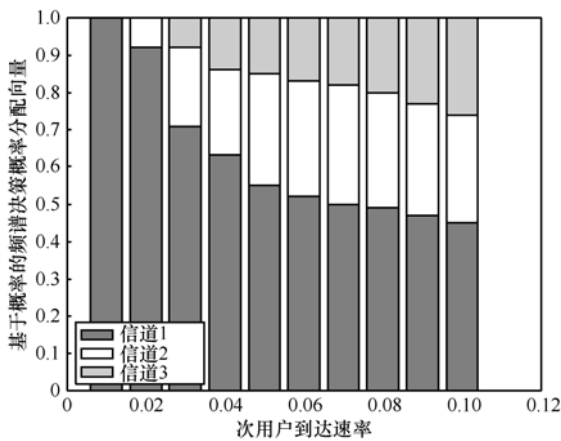


图 7 理想状态下基于概率的频谱决策方法次用户概率分配向量

图 8 给出了非理想状态下次用户的概率分配向量。从图 8 中可以看出，由于虚警概率的存在，信道 1 虽然仍是最受欢迎的信道，但却不再是低速率业务流情况下的必然选择。随着次用户业务量的增大，各个信道间的业务量趋于均衡分布。

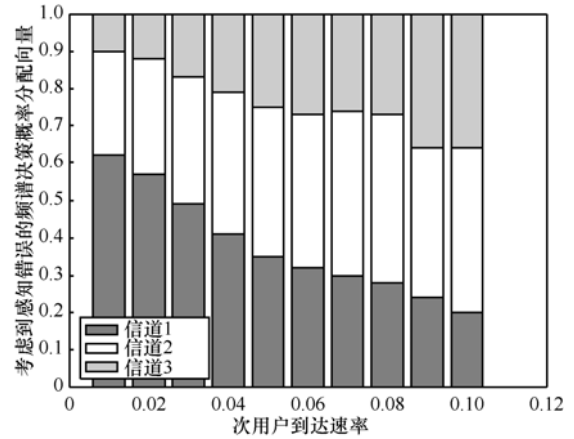


图 8 考虑到感知错误、无线信道衰落等影响的基于概率的频谱决策概率分配向量

对于基于感知的信道决策方法，给出了非理想状态下次用户的平均驻留时间，如图 9 所示。为了对比结果，仿真了次用户占用时间期望值分别为 10ms 和 20ms 的情况，并且在漏检概率和中断概率固定为 0.1 的情况下，考虑了不同虚警概率的影响。由图 9 可知，随着虚警概率的增大，次用户的驻留时间急剧上升。

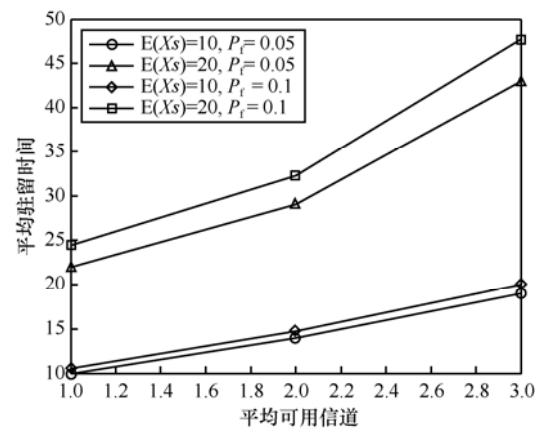


图 9 考虑到感知错误的算法驻留时间

图 10 和图 11 给出了本文提出的时延最优频谱决策方法在不同次用户到达速率情况下的平均驻留时间和相应的频谱利用率。从图 10 可以看出，当感知时间 τ 较小时，基于感知的频谱决策方法的时延性能要好于基于概率的频谱决策方法。此外，当业务量较小时，基于概率的频谱决策方法要优于基于感知的，原因在于由于次用户业务量较小，叠加在信道上的业务量也很小，偶尔的伺机占用不会带来冲突等问题，因此时延较小。但随着次用户业务量的增大，如超过 0.022 时，基于感知的时延性能要优于基于概率的频谱决策，因为次用户的加入

会带来冲突等不利影响。从图 11 可以看出, 随着次用户业务的增加, 信道利用率逐渐上升。

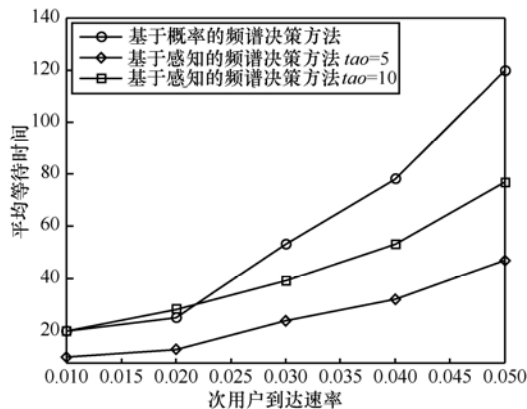


图 10 时延最优的频谱决策方法的次用户平均驻留时间

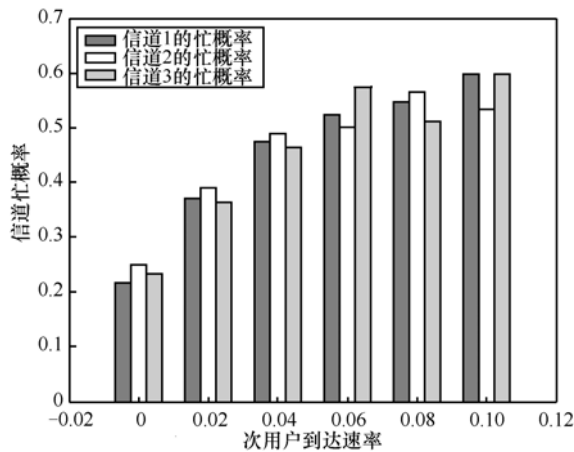


图 11 时延最优频谱决策方法下频谱的利用率

5 结束语

本文在认知网络频谱管理架构下, 针对认知网络的频谱决策问题展开研究。提出了基于概率和基于感知的频谱决策方案。对于基于概率的频谱决策, 采用了短时业务优先的排队策略, 并基于在次用户业务流中划分多个优先级的一般化方法推导出了一般结果。对于基于感知的频谱决策方法, 允许被中断用户选择其他更优信道接入, 从而减少了等待时延, 并在两者分析的基础上, 提出了时延最优的频谱决策方法。上述决策方法均考虑到信道的异构特性、PHY 层感知错误以及无线信道的中断概率, 本文的结论可以为认知网络的实现提供参考。未来的研究集中在基于概率的频谱决策中有限个优先级状态的时延分析以及其他优化目标的选择上, 如吞吐量、时延抖动等。

参考文献:

- [1] The federal communications commission spectrum policy task force report[B]. IEEE Transactions on Information Forensics Security, 2002, 2-135.
- [2] The federal communications commission second report and order and memorandum opinion order[B]. ET Docket, 2008, 8-260.
- [3] The federal communications commission second memorandum opinion and order[B]. FCC, 2010, 10-174.
- [4] The federal communications commission. ET Docket[B]. 2010, 10-236.
- [5] MITOLA J. Cognitive Radio: an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [6] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [7] AKYILDIZ I, LEE W, VURAN M, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(50):2127-2159.
- [8] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K. CRAHNS: cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks Journal (Elsevier), 2012, 4(4):342-348.
- [9] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, *et al.* A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, (4):40-48.
- [10] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks[J]. IEEE Network, 2009, 23(4):23.
- [11] ZHAO Q, SADLER B. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Process Mag, 2007, 24(3):79-89.
- [12] LEE W, AKYILDIZ I F. A spectrum decision framework for cognitive radio[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2011,10(2):161-174.
- [13] WANG L, WANG C, ADACHI F. Load-balancing spectrum decision for cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communication, 2011, 29(4):757-769.
- [14] WANG L, WANG C, FENG K. A queuing-theoretical framework for QoS-enhanced spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communication Magazine, 2011, 18(6):18-26.
- [15] LI J, ZHANG L. Analytical model for dynamic spectrum decision in cognitive radio ad hoc networks: a stochastic framework[J]. Future Intelligent Information Systems, 2011, 86:325-332.
- [16] YAO Y. PhD Dissertation: a Spectrum Decision Support System for Cognitive Radio Networks[D]. Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2012.
- [17] SUNDARAMAHESWARI V T. Feature selection based spectrum decision making for cognitive radio networks[J]. International Journal of Computer Science & Emerging Technology, 2012,3(2):46-54.
- [18] LO S C, TSENG C W. A novel multi-channel mac protocol for wireless ad hoc networks[A]. IEEE Vehicular Technology Conference

- Fall[C]. Dublin, Ireland, 2007. 46-50.
- [19] ZHU P, LI J, WANG X. A new channel parameter for cognitive radio[A]. International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)[C]. Orlando, Florida, USA, 2007. 482-486.
- [20] KIM T S, LIM H, HOU J C. Understanding and improving the spatial reuse in multi-hop wireless networks[J]. IEEE Transaction On Mobile Computing, 2008,7(10):1200-1212.
- [21] BANAEI A, GEORGHIADES C N. Throughput analysis of a randomized sensing scheme in cell-based ad-hoc cognitive networks[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Dresden, Germany, 2009. 1-6.
- [22] GAMBINI J, SIMEONE O, BAR-NESS Y, *et al.* Packet-wise vertical handover for unlicensed multi-standard spectrum access with cognitive radios[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5172-5176.
- [23] GAMBINI J, SIMEONE O, SPAGNOLINI U, *et al.* Cognitive radio with secondary packet-by-packet vertical handover[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Beijing, China, 2008. 1050-1054.
- [24] NOH G, LEE J, HONG D. Stochastic multichannel sensing for cognitive radio systems: optimal channel selection for sensing with interference constraints[A]. IEEE Vehicular Technology Conference Fall[C]. Barcelona, Spain, 2009. 1-5.
- [25] LEE C M, LIN J S, HSU Y P, *et al.* Design and analysis of optimal channel-hopping sequence for cognitive radio networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. Sydney, Australia, 2010. 1-6.
- [26] STEVENSON C R, CHOUINARD G, LEI Z, *et al.* IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard[J]. IEEE Communication Magazine, 2009,47(1): 130-138.
- [27] WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1):5-23.
- [28] JAISWAL N K. Priority Queues. Academic Press, New York.1968.
- [29] OLIVER R M, PESTALOZZI G. On a problem of optimum priority classification[J]. Journal of Applied and Industrial Mathematics, 1965, 13(3):890-901.
- [30] COX D R. Renewal Theory[M]. Butler Tanner, Frome:Butler and Tanner, 1962.
- [31] BELLMAN R. Dynamic Programming[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1957.
- [32] WANG C W, WANG L C, ADACHI F. Optimal admission control in cognitive radio networks with sensing errors[J]. IEICE Technical Report, 2010, 109(RCS-440):491-496.

作者简介:



孙武剑 (1984-), 男, 安徽太和人, 信息工程大学博士生, 主要研究方向为认知网络的频谱管理技术。

李娜 (1984-), 女, 安徽太和人, 信息工程大学博士生, 中国北方电子设备研究所工程师, 主要研究方向为认知网络的频谱管理技术。

刘洋 (1982-), 男, 辽宁沈阳人, 信息工程大学博士生, 主要研究方向为认知网络的动态频谱接入技术。

孙乐 (1985-), 男, 内蒙古包头人, 中国北方电子设备研究所助理工程师, 主要研究方向为无线移动网络的资源分配技术。

陈韬 (1988-), 男, 湖南益阳人, 中国北方电子设备研究所助理工程师, 主要研究方向为认知无线网络的频谱决策和共享技术。

李昊 (1988-), 男, 山东淄博人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信体系架构设计和分析技术。

李鸥 (1961-), 男, 陕西汉中, 信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信中的信号处理、无线资源管理和通信协议分析。