

认知无线网络中基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法

马彬 包小敏* 谢显中

(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 在主动频谱切换中, 预先确定目标信道存在高失效风险, 从而增加切换时延的问题。该文提出一种基于混合主被动频谱切换的最优目标信道选择算法。该算法结合主动频谱切换和被动频谱切换的优点, 引入最小累积切换时延评价标准, 综合考虑次用户的多次中断、主用户的到达率和非理想频谱检测对次用户累积切换时延的影响, 并详细分析和推导了非理想检测下次用户的累积切换时延。仿真表明, 相较于主动和被动频谱切换中目标信道选择策略, 在信道状态变化频繁或业务量较大等极端情况下, 该算法的性能优势尤为明显。

关键词: 认知无线电; 信道选择; 频谱切换; 混合式; 非理想检测

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)01-0031-07

DOI: 10.11999/JEIT160268

Optimal Target Channel Selection Algorithm Based on Hybrid Spectrum Handoffs in Cognitive Radio Networks

MA Bin BAO Xiaomin XIE Xianzhong

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The predetermined target channel has high risk of being unavailable in the proactive-decision spectrum handoff. To solve this problem, an optimum target channel selection algorithm based on hybrid spectrum handoff is proposed. This algorithm coordinates the advantages of both the proactive-decision and reactive-decision spectrum handoffs. With the metric of minimizing the cumulative handoff delay, the impacts of secondary user's multiple interruptions, primary user's arrival rates and imperfect sensing on secondary user's cumulative handoff delay are included and the detailed analysis and derivation of the secondary user's cumulative handoff delay are conducted under imperfect sensing. Compared with proactive-decision and reactive-decision target channel selection schemes, the simulation results demonstrate that the performance of the proposed algorithm is especially excellent with frequent channel states variations or heavy traffic loads.

Key words: Cognitive Radio (CR); Channel selection; Spectrum handoff; Hybrid mode; Imperfect sensing

1 引言

认知无线网络中非授权用户(即次用户, SU)可以机会式地利用授权用户(即主用户, PU)的频谱, 从而提高频谱的利用率, 解决频谱资源匮乏的问题。主用户的优先级大于次用户。当主用户返回授权频谱时, 次用户必须无条件立即退出该频谱, 寻找新的空闲频谱继续传输数据, 而不能对主用户造成干

扰, 这个过程就是频谱切换^[1,2]。按频谱共享方法可以将频谱切换分为主动、被动和混合频谱切换3类^[3]。在主动频谱切换机制中^[4,5], 次用户可以根据长期的观测和历史信息, 在主用户到达之前预测出目标信道。但是候选信道存在更新问题, 从而导致其选择的信道不可用。特别是在信道状态变化频繁的环境中, 该问题尤为突出。在被动频谱切换机制中^[6,7], 目标信道是按需寻找的。当频谱切换发生时, 次用户立即通过频谱感知寻找空闲信道。被动频谱切换会带来感知时延, 使切换的时延性能降低。综上所述, 基于主被动频谱切换机制的信道选择策略各有优缺点。因此混合频谱切换机制试图融合两种机制信道选择策略的优点, 提高信道选择的效率。目前这方面的研究工作相对较少。

主动、被动和混合频谱切换中目标信道的确定方法各不相同。文献[8]提出了主动决策频谱切换的

收稿日期: 2016-03-21; 改回日期: 2016-07-25; 网络出版: 2016-10-09

*通信作者: 包小敏 505965590@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271259, 61301123, 61471076), 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA40047), 重庆邮电大学博士启动基金(A2014-10, A2015-16)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271259, 61301123, 61471076), The Foundation and Advanced Research Program of Chongqing (cstc2015jcyjA40047), The Doctoral Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2014-10, A2015-16)

目标信道选择方案, 该方案能使频谱切换失败概率最小。文献[9]提出了两种机会式的信道选择算法: 最小碰撞率信道选择算法和最小切换率的信道选择算法, 使次用户吞吐量最大化。文献[10]提出一种基于概率的方法, 利用凸优化问题求解次用户的最小扩展服务时间, 决定单个次用户的认知无线网络中频谱切换的初始信道和目标信道。文献[11]利用排队论建立模型, 以最小累积切换时延作为选择最优目标信道的标准。这些文献中目标信道选择算法都只是在一种频谱切换机制中进行, 不能扬长避短, 综合各种频谱机制的优势。

除此之外, 以上文献在讨论频谱切换中的信道选择时, 均假设次用户对频谱的感知不存在漏检和虚警等错误检测的情况。但是, 在实际的认知无线网络中不可避免地存在噪声、多径、阴影等非理想信道因素。因此, 研究非理想检测下频谱切换中的信道选择算法非常必要。目前只有少量的文献涉及到这方面的工作。文献[12]建立了一个基于学习和体验质量驱动的频谱切换方案, 利用加强学习的方法选择最优目标信道。文献[13]设计了一个负载均衡的多用户频谱判决方案, 分析了多次中断、检测错误和不同信道容量对频谱判决的影响。文献[12,13]只考虑漏检和虚警对切换性能的影响, 没有分析漏检和虚警对目标信道选择的影响。

针对上述问题, 本文综合了主动频谱切换和被动频谱切换的优点, 利用 PRP M/G/1 排队网络模型, 提出一个基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法。该算法中次用户的初始目标信道预先确定。但是, 当次用户切入到预先的目标信道中需要等待时, 可以立即利用这一时段感知信道, 选择等待时延和感知时延的最小值作为一次频谱切换的时延。最终以累积切换时延最小的信道作为最优的目标信道序列。本文的主要贡献概括如下:

(1) 提出一种基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法。该算法引入累积切换时延作为主要的评价标准, 综合了主动频谱切换和被动频谱切换两种制式的优势, 从而降低次用户的累积切换时延, 提高了切换的整体性能。

(2) 考虑了次用户的多次中断、主用户的到达率和非理想频谱检测对次用户累积切换时延的影响。重点分析了非理想频谱检测环境下的信道选择问题。详细推导了漏检概率和虚警概率对主用户平均服务时间的增加量。进一步说明了非理想检测对切换时延的影响。

2 基于混合频谱切换的网络场景和问题假设

在认知无线电系统中, 把频谱分成了多个信道,

将一个信道分为多个时隙。为了保护主用户, 次用户必须在每个时隙的开头进行频谱感知。如果检测到信道空闲, 次用户可以在该时隙传输数据。反之, 如果信道状态为忙碌, 次用户执行频谱切换过程寻找新的目标信道传输未传完的数据。每个主用户都有自己的授权信道, 主用户接入授权信道的优先级大于次用户。如果优先级相同的用户同时接入信道时采用先到先服务的调度原则。为简化分析, 假设每个主次用户预先安排一个初始信道, 在一个信道的一个时隙只能有一个用户传输数据。

次用户在传输过程中, 次用户可能会受到多次中断, 可能会进行多次频谱切换。主动频谱切换中, 由于信道条件是实时变化的, 预先确定的目标信道在需要切换时, 可能已经不再是最优的目标信道。根据统计学的方法, 主动频谱切换中存在等待时延 $E[Y_p]$ 和 $E[W_s]$ 。其中, $E[Y_p]$ 是次用户停留在当前信道所需的时延, $E[W_s]$ 是次用户切换到预先确定的目标信道中可能需要等待的时段。鉴于此, 本文提出了基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法。假设目标信道序列已经通过主动决策预先确定。当次用户执行频谱切换的时候, 如果目标信道可用, 次用户立即切换到目标信道中。如果目标信道不可用, 不同于传统的在目标信道等待的方法, 次用户可以借用被动频谱切换的方法立刻进行实时频谱感知。令次用户感知到新的可用信道所需的感知时间为 $E[S]$ 。如果感知时间小于在目标信道的等待时间, 切换到实时感知到的信道上所花的时间要小于在目标信道的等待时间。为减少切换时延, 次用户应该切换到新感知到的信道中传输数据。反之, 如果感知时间大于在目标信道的等待时间, 次用户选择继续等待在原目标信道是最好的选择。由于次用户频谱感知是在目标信道等待时段内进行, 如果次用户的感知时间太大也不会增加该次切换时延。

本文假设次用户检测到多个可用信道时随机选择一个信道作为新的目标信道。图 1 在理想频谱检测的假定下, 举例说明了基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法中次用户 5 次中断的切换过程。具体描述如下:

(1) 开始 SU_A 在初始信道 Ch1 上, SU_A 预先确定的目标信道序列为 (Ch2, Ch1, Ch3, Ch2, Ch1)。第 1 次中断, 目标信道序列中第 1 个信道是 Ch2, SU_A 从 Ch1 切换到空闲的 Ch2 上。

(2) 第 2 次中断, SU_A 预先确定的目标信道是 Ch1, 但是 SU_A 切换到 Ch1 中需要等待 $E[W_s]$ 后信道才空闲。此时 SU_A 重新感知到可用信道 Ch3 所用的感知时间为 $E[S]$, 由于 $E[S] < E[W_s]$, SU_A 改变预先确定的信道从 Ch2 切换到 Ch3 中。

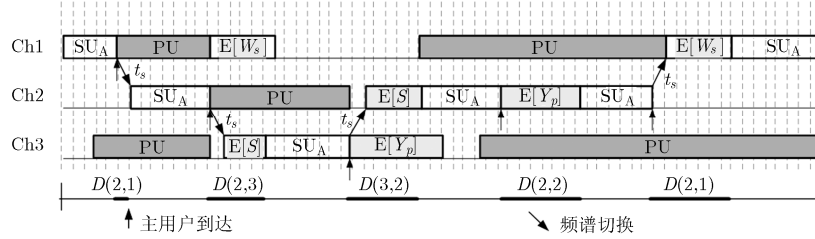


图 1 基于混合频谱切换的最优信道选择算法举例

(3)第 3 次中断, SU_A 预先确定的目标信道是 Ch3, 但是 SU_A 切换到 Ch3 中需要等待 $E[Y_p]$ 后信道才空闲。此时 SU_A 重新感知到可用信道 Ch2 所用的感知时间为 $E[S]$, 由于 $E[S] < E[Y_p]$, SU_A 改变预先确定的信道从 Ch3 切换到 Ch2 中。

(4)第 4 次中断, SU_A 预先确定的目标信道是 Ch2, 并且需要等待 $E[Y_p]$ 后再传输数据。由于此时感知到新的空闲信道所需的感知时间 $E[S]$ 较大。因此 SU_A 停留在 Ch2 中。

(5)第 5 次中断, SU_A 预先确定的目标信道是 Ch1, SU_A 切换到 Ch1 中需要等待 $E[W_s]$ 后信道才空闲。由于此时感知时间 $E[S]$ 较大, SU_A 从预先确定的信道 Ch2 切换到 Ch1 中。综上, SU_A 5 次中断实际的目标信道序列为 (Ch2, Ch3, Ch2, Ch2, Ch1)。

3 基于混合频谱切换的累积时延分析

3.1 理想检测中的累积时延分析

假设 CR 系统中有 M 个独立信道, 目标信道序列最大长度为 L 。首先分析在理想检测中的累积时延。设 N 为次用户的最大中断次数, $N < L$ 。根据全概率公式, 次用户的累积频谱切换时延 $E[D^*(s(\eta))]$ 如式(1)。其中, $D(s_{i-1}, s_i)$ 是次用户从 s_{i-1} 信道切换到 s_i 信道的时延, 注意 s_{i-1} 和 s_i 可能相同, 也可能不同。

$$\begin{aligned} E[D^*(s(\eta))] &= \sum_{n=1}^L \Pr\{N = n\} E[D^*(s)|N = n] \\ &= \sum_{n=1}^L \Pr\{N = n\} \sum_{i=1}^n E[D(s_{i-1}, s_i)] \quad (1) \end{aligned}$$

首先推导式(1)中的 $E[D(s_{i-1}, s_i)]$ 。传统的主动频谱切换中, 次用户可以停留在当前信道等待 $E[Y_p^{(s_i)}]$ 再传输数据; 或者切换到其他信道, 切入其他信道时, 如果目标信道暂时不可用, 则等待 $E[W_s^{(s_i)}]$ 后再传输数据。本文提出的混合频谱切换信道选择算法, 次用户通过主动频谱切换预先确定目标信道序列。如果在目标信道中需要等待时, 立即启动被动频谱切换的策略去感知信道。设次用户感知信道所花的感知时间为 $E[S]$, 取感知时间和等待时间的最小值作为最优的切换时延。综上, 每次切换的时延

$E[D(s_{i-1}, s_i)]$ 为

$$E[D(s_{i-1}, s_i)] = \begin{cases} E[Y_p^{(s_i)}], & s_{i-1} = s_i, \\ E[Y_p^{(s_i)}] < E[S^{(s_i)}] + t_s, & \\ E[W_s^{(s_i)}] + t_s, & s_{i-1} \neq s_i, \\ E[W_s^{(s_i)}] < E[S^{(s_i)}] & \\ E[S^{(s_i)}] + t_s, & E[S^{(s_i)}] < E[W_s^{(s_i)}], \\ E[S^{(s_i)}] + t_s < E[Y_p^{(s_i)}] & \end{cases} \quad (2)$$

本文采用了 PRP M/G/1 排队网络模型。假设主次用户的到达过程服从泊松分布, 主次用户在初始信道 η 上的到达率分别为 $\lambda_p^{(\eta)}$, $\lambda_s^{(\eta)}$ 。对应的服务时间及其概率密度函数分别为 $X_p^{(\eta)}$, $X_s^{(\eta)}$, $f_p^{(\eta)}(x)$ 和 $f_s^{(\eta)}(x)$ 。 $\lambda_p^{(\eta)}$, $\lambda_s^{(\eta)}$, $f_p^{(\eta)}(x)$ 和 $f_s^{(\eta)}(x)$ 4 个 CR 网络中的流量参数可通过文献[14]得到。根据文献[4]可知 $E[X_p^{(s_i)}]$ 和 $E[W_s^{(s_i)}]$ 的解析表达式分别为

$$E[Y_p^{(s_i)}] = \frac{E[X_p^{(s_i)}]}{1 - \lambda_p^{(s_i)} E[X_p^{(s_i)}]} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E[W_s^{(s_i)}] &= \frac{\lambda_p^{(s_i)} E[X_p^{(s_i)}]^2 + \lambda_s^{(s_i)} E[X_s^{(s_i)}]^2}{(1 - \lambda_p^{(s_i)} E[X_p^{(s_i)}])(1 - \lambda_p^{(s_i)} E[X_p^{(s_i)}] - \lambda_s^{(s_i)} E[X_s^{(s_i)}])} \quad (4) \end{aligned}$$

感知时间 $E[S^{(s_i)}]$ 是次用户从开始频谱感知到检测可用信道的时段。假设次用户对所有信道进行一次扫描所需的时间是 τ , 如果一次扫描就得到可用信道, 就停止扫描。否则, 次用户可能需要进行多次扫描, 直到找到可用信道为止。因此, 次用户首次找到可用信道进行的扫描次数服从几何分布。根据几何分布的性质, 平均扫描次数可表示为

$$E[j] = \sum_{j=1}^{\infty} j \rho_i^{j-1} (1 - \rho_i) = \frac{1}{1 - \rho_i} \quad (5)$$

其中, ρ_i 为次用户被中断 i 次后所有信道都忙碌的概率。进而得到平均感知时间 $E[S]$ 为

$$E[S] = \tau E[j] = \frac{\tau}{1 - \rho_i} \quad (6)$$

由于次用户在传输过程中可能会受到多次中

断, 定义 $w_i^{(k)}$ 和 $\Phi_i^{(k)}$ 分别为次用户被中断 i 次后在信道 k 上的到达率和服务时间。由文献[4]可得

$$\rho^{(k)} = \rho_p^{(k)} + \sum_{i=0}^n \rho_i^{(k)} = \lambda_p^{(k)} \mathbb{E}[X_p^{(k)}] + \sum_{i=0}^n w_i^{(k)} \mathbb{E}[\Phi_i^{(k)}] < 1 \quad (7)$$

$$w_i^{(k)} = \lambda_s^{(k)} \left(\frac{\lambda_p^{(k)}}{\lambda_p^{(k)} + u_s^{(k)}} \right)^i \quad (8)$$

$$\mathbb{E}[\Phi_i^{(k)}] = \frac{1}{\lambda_p^{(k)} + u_s^{(k)}} \quad (9)$$

其中, $u_s^{(k)} = 1/\mathbb{E}[X_s^{(k)}]$ 。将式(7)~式(9)代入式(6)可得到感知时间 $\mathbb{E}[S]$ 的表达式。最后, 将式(3)、式(4)和式(6)代入式(2)中可得到次用户单次切换的切换时延 $\mathbb{E}[D(s_{i-1}, s_i)]$ 。

其次推导式(1)中的 $\Pr\{N = n\}$ 。根据全概率公式, 可得

$$\Pr\{N = n\} = \Pr\{N = n | N \geq n\} \Pr\{N \geq n\} \quad (10)$$

$p_i^{(s_i)}$ 表示在信道 s_i 上次用户 i 次中断后又被中断的概率。因为 $p_i^{(s_i)} = \Pr\{N \geq i | N \geq i\}$, 则

$$1 - p_n^{(s_n)} = \Pr\{N \geq n | N \geq n\} - \Pr\{N > n | N \geq n\} = \Pr\{N = n | N \geq n\} \quad (11)$$

$$\Pr\{N \geq n\} = \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\Pr\{N \geq i+1\}}{\Pr\{N \geq i\}} = \prod_{i=0}^{n-1} \Pr\{N \geq i+1 | N \geq i\} = \prod_{i=0}^{n-1} p_i^{(s_i)} \quad (12)$$

因为 $\Pr\{N \geq 0\} = 1$ 并且 $\Pr\{N \geq i+1 | N \geq i\} = \frac{\Pr\{N \geq i+1\}}{\Pr\{N \geq i\}}$, 我们可以得到次用户恰好中断 n 次的概率为

$$\Pr\{N = n\} = \left(1 - p_n^{(s_n)} \prod_{i=0}^{n-1} p_i^{(s_i)} \right) \quad (13)$$

其中, $p_i^{(s_i)} = \lambda_p^{(s_i)} \mathbb{E}[\Phi_i^{(k)}]$ 。最后, 将式(2)和式(12)代入式(1)中可得到次用户在整个切换过程中的累积切换时延。

3.2 非理想检测中的时延分析

3.1 节中分析了理想检测下次用户的累积切换时延, 但是在实际的 CR 系统中, 次用户不可避免地存在漏检和虚警等非理想检测的情况。因此本节主要分析漏检和虚警对频谱切换累积切换时延的影响。当实际的信道状态为忙碌, 而次用户错误地检测为空闲时, 会发生漏检。发生漏检时, 主次用户发生碰撞, 主用户必须在下个时隙重新传送错误的数数据帧, 因此主用户的服务时间会增加。当实际的信道空闲, 但次用户检测为忙碌, 会发生虚警。当发生虚警时, 即使信道空闲次用户也不能在该信道

传输数据, 次用户需要重新寻找空闲信道, 因此次用户的服务时间也会增加。文中虚警和漏检概率分别用 P_F 和 P_M 表示。

首先分析虚警。虚警发生会延长次用户的服务时间, 假设次用户在信道 k 上被延长后实际的服务时间为 $\widehat{X}_s^{(k)}$ 。由文献[12]可知

$$\mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)}] = \sum_{x=1}^{\infty} \mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)} | X_s^{(k)} = x] \Pr\{X_s^{(k)} = x\} \quad (14)$$

其中, x 为次用户工作的时隙。由于发生虚警的时隙不能被其他用户使用, 可以看作是忙碌的时隙, 则有

$\rho_s^{(k)} = \lambda_s^{(k)} \mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)}]$ 。当虚警发生时, 数据传输会延

迟到下一个空闲时隙。如果次用户当前时隙为 x , 发生虚警的时隙有 i 个。则次用户实际的服务时间将延长到第 $x+i$ 个时隙。故式(13)中次用户实际服务时间的条件期望服从负二项分布。根据其性质可得

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)} = x+i | X_s^{(k)} = x] &= \sum_{x=1}^{\infty} (x+i) \binom{x+i-1}{i} (1-P_F)^i (P_F)^i \\ &= \frac{x}{1-P_F} \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)中, 可得次用户实际的服务时间期望为

$$\mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)}] = \sum_{x=1}^{\infty} \frac{x}{1-P_F} \Pr\{X_s^{(k)} = x\} = \frac{\mathbb{E}[X_s^{(k)}]}{1-P_F} \quad (16)$$

其次分析漏检。漏检发生会延长主用户的服务时间, 假设主用户在信道 k 上被延长后实际的服务时间为 $\widehat{X}_p^{(k)}$ 。由文献[12]可知

$$\mathbb{E}[\widehat{X}_p^{(k)}] = \sum_{x=1}^{\infty} \mathbb{E}[\widehat{X}_p^{(k)} | X_p^{(k)} = x] \Pr\{X_p^{(k)} = x\} \quad (17)$$

类似于虚警的分析, $\widehat{X}_p^{(k)}$ 服从参数为漏检概率 P_M 的负二项分布。根据其性质可得

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\widehat{X}_p^{(k)} = x+i | X_p^{(k)} = x] &= \sum_{x=1}^{\infty} (x+i) \binom{x+i-1}{i} (1-P_M)^i (P_M)^i \\ &= \frac{x}{1-P_M} \end{aligned} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)中, 可得主用户实际的服务时间期望为

$$\mathbb{E}[\widehat{X}_p^{(k)}] = \sum_{x=1}^{\infty} \frac{x}{1-P_M} \Pr\{X_p^{(k)} = x\} = \frac{\mathbb{E}[X_p^{(k)}]}{1-P_M} \quad (19)$$

利用式(16)和式(19), 用 $\mathbb{E}[\widehat{X}_p^{(k)}]$ 和 $\mathbb{E}[\widehat{X}_s^{(k)}]$ 分别代替 3.1 小节中的 $\mathbb{E}[X_p^{(k)}]$ 和 $\mathbb{E}[X_s^{(k)}]$, 可得到非理想

频谱检测情况下，次用户频谱切换中累积切换时延的表达式。

4 基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法

不同的目标信道序列会影响累积切换时延的大小，目标信道的设计就是一个累积切换时延的最小化问题。频谱切换的目标信道序列为 $s(\eta) = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ ，其中 s_i 是第 i 次中断的目标信道， $s_0 = \eta$ 。假设备选信道集合为 $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ ，目标信道序列的长度为 L 。累积切换时延的最小化问题决定次用户的一个最优目标信道序列。因此，次用户的最优目标信道序列 $s^*(\eta)$ 为

$$s^*(\eta) = \arg \min_{s(\eta) \in \Omega^L} \{E[D^*(s(\eta))]\} \quad (20)$$

其中， $E[D^*(s(\eta))]$ 是次用户的累积切换时延， Ω^L 是所有可能的长度为 L 的目标信道序列， L 也可以理解为次用户的最大中断次数。本文提出的基于混合频谱切换目标信道选择算法，有效地找到次用户累积切换时延最小的信道。

本文算法与随机信道选择策略、主动和被动频谱切换信道选择策略相比，复杂度各有不同。由于次用户发生频谱切换时所需的切换执行时间非常小，因此，本文从次用户寻找目标信道的搜索时间的角度来探讨算法的复杂度。设次用户搜索到一个确定的信道所需时间为 t_1 ， t_1 一般非常小。则随机信道选择策略的搜索时间为 Lt_1 。主动频谱切换信道选择策略中，利用穷举算法可知目标信道序列有 M^L 种排列，则该策略的搜索时间为 $M^L Lt_1$ 。设次用户通过频谱感知而搜索到一个可用信道所需的时间为 t_2 ，且 $t_1 < t_2$ 。则被动频谱切换信道选择策略的搜索时间为 Lt_2 。本文算法中发生一次频谱切换时，如果次用户的等待时间小于感知时间，则搜索到信道的时间为 t_1 ；反之，次用户搜索到信道的时间为 t_2 。因此，本文算法中总的搜索时间的最大值为 Lt_2 。综上所述，当 L 较大时，随机信道选择策略的搜索时间最小，主动频谱切换信道选择策略最大，被动频谱切换信道选择策略和本文算法介于二者之间，且本文算法的搜索时间小于等于被动频谱切换信道选择策略。

5 仿真分析

本节采用 Matlab 数值仿真的方法验证基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法相对于其他信道选择方法优势。4 种信道选择方法分别是：(1) 随机信道选择策略；(2) 基于主动决策的信道选择策略；(3) 基于被动决策的信道选择策略；(4) 基于混合频谱切换的最优目标信道选择策略。随机信道选择在需要切换时，以相同的概率在备选信道中选择一

个目标信道。基于主动决策的信道选择策略根据长期的观察和统计数据，综合各种指标预先确定一个目标信道序列。为了得到最小的平均累积时延，可以采用穷举法对所有可能目标信道序列分别计算平均累积时延，从中选择最小时延所对应的目标信道序列。基于被动决策的信道选择策略在需要切换时，立即通过频谱感知来寻找合适的目标信道。基于混合频谱切换的策略是选择等待时延和感知时间最小的信道作为目标信道。

5.1 理想检测下次用户的累积切换时延分析

图 2 比较了在理想检测中 4 种信道选择方案的次用户的累积切换时延。仿真中假设有 4 个信道。假设次用户的到达率和服务时间分别为 $\lambda_s^{(k)} = 0.01$ ， $E[X_s^{(k)}] = 10$ ， $1 \leq k \leq 4$ 。主用户的服务时间 $(E[X_p^{(1)}]$ ，

$E[X_p^{(2)}]$ ， $E[X_p^{(3)}]$ ， $E[X_p^{(4)}]) = (10, 12, 14, 16)$ 。如图 2 所示，4 种信道选择方案中随着 λ_p 的增加，次用户的累加切换时延都增大。在 λ_p 相同时，随机信道选择方案中次用户的累积切换时延最大，其次，依次是主动和被动决策信道选择策略，最小的是基于混合频谱切换的信道选择策略。当 $\lambda_p < 0.013$ 时，主动决策信道选择策略的平均累积时间比被动决策信道选择策略小。当 $\lambda_p > 0.013$ 时，主动决策信道选择策略的平均累积时延大于被动决策信道选择策略。当 $\lambda_p < 0.01$ 时，由于等待时间小于感知时间，次用户的目标信道与预先确定的预先信道相同，因此主动决策信道选择策略与混合频谱切换信道选择策略的曲线重合。当 $\lambda_p > 0.01$ 时，次用户的感知时间小于等待时间，目标信道是新感知到的空闲信道，因此混合频谱切换信道选择策略中次用户的累积切换时延最小。

5.2 主用户的到达率对次用户累积切换时延的影响

图 3 和图 4 中假设次用户的到达率和服务时间分布为 $\lambda_s^{(k)} = 0.01$ ， $E[X_s^{(k)}] = 10$ ， $1 \leq k \leq 4$ ，主用户的服务时间 $(E[X_p^{(1)}]$ ， $E[X_p^{(2)}]$ ， $E[X_p^{(3)}]$ ， $E[X_p^{(4)}]) = (10, 12, 14, 16)$ 。图 3 中假设漏检概率 $P_M = 0.3$ 。如图 3 所示，随着主用户到达率的增加，4 种信道选择方案中次用户的累积切换时延都增大。虚警概率 P_F 从 0.1 增加到 0.5 时，4 种信道选择方案中次用户的累积切换时延都有不同程度的增加。图 4 中假设虚警概率 $P_F = 0.3$ 。如图 4 所示，漏检概率 P_M 从 0.1 增加到 0.5 时，4 种信道选择方案中次用户的累积切换时延都有不同程度的增加。在基于混合频谱切换的信道选择策略中， P_M 从 0.1 增加到 0.5 时，次用户的累积切换时延的增加量比其他 3 种信道选择策略的增加量小。因此，漏检概率对基于混合频谱切换的信道选择策略中的次用户累积切换时延的影响较小。

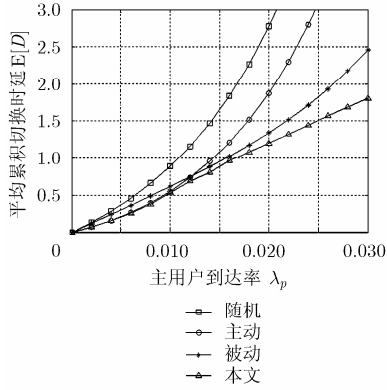


图 2 理想检测下 4 种信道选择方案

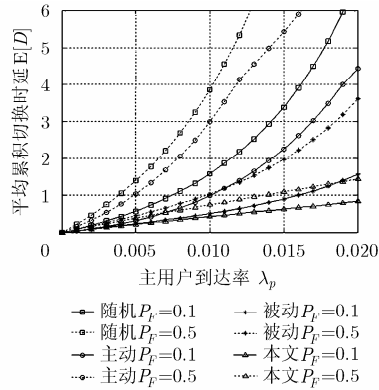


图 3 不同虚警概率下主用户到达率对累积切换时延的影响

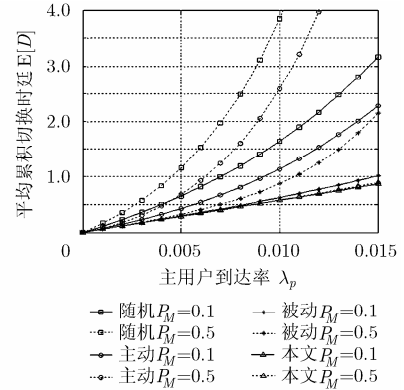


图 4 不同漏检概率下主用户到达率对累积切换时延的影响

5.3 虚警和漏检概率对次用户累积切换时延的影响

图 5 和图 6 中假设主用户的到达率和服务时间分布为 $\lambda_s^{(k)} = \lambda_p^{(k)} = 0.01$, $E[X_s^{(k)}] = 8$, $1 \leq k \leq 4$ 。主用户的服务时间 $(E[X_p^{(1)}], E[X_p^{(2)}], E[X_p^{(3)}], E[X_p^{(4)}]) = (10, 12, 14, 16)$ 。如图 5 所示, 随着虚警概率 P_F 增加, 4 种信道选择方案中次用户的累积切换时延都有不同程度的增加。其中基于混合频谱切换的信道选择策略累积切换时延增量最小。 P_M 从 0.1 增加到 0.5 时, 基于混合频谱切换的信道选择方案的累积切换时延基本不变, 而其他 3 种信道选择策略都有一定的增量。图中当 $P_F < 0.5$ 时, 次用户的累积切换时延缓慢增加; 反之, 累积切换时延迅速增加。如图 6 所示, 随着 P_M 增加, 4 种信道选择策略中次用户的累积切换时延均有不同程度的增加。其中基于混合频谱切换的信道选择方案的累积切换时延的增量非常小, 远小于其他 3 种信道选择方案。因此, 基于混合频谱切换的信道选择方案受漏检概率的影响很小。

5.4 信道的阻塞概率分析

本小节分析基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法在信道阻塞概率上的优势, 定义每次切换

的最优目标信道序列上信道忙碌概率的乘积为信道的阻塞概率。图 7 和图 8 中假设 $P_M = P_F = 0.1$, 次用户的服务时间为 $E[X_s^{(k)}] = 10$, $1 \leq k \leq 4$ 。主用户的服务时间 $(E[X_p^{(1)}], E[X_p^{(2)}], E[X_p^{(3)}], E[X_p^{(4)}]) = (10, 12, 14, 16)$ 。图 7 中假设 $\lambda_s = 0.01$, 如图 7 所示, 随着 λ_p 主用户到达率的增加, 4 种信道选择方案中阻塞概率均有不同程度的增加。随机信道选择方案增加最快, 其次, 依次是基于主动和被动频谱切换的信道选择方案, 基于混合频谱切换的信道选择策略中阻塞概率增加最慢。尤其是在 λ_p 比较大时, 基于主动频谱切换方案中, 预先确定的目标信道序列中信道不可用的概率增加, 此时基于混合频谱切换的信道选择策略的优势更加明显。图 8 假设 $\lambda_p = 0.01$, 如图 8 所示, 随着 λ_s 增加, 4 种信道选择方案中阻塞概率均有不同程度的增加。这是因为 λ_s 增加, 信道中的业务量增加, 信道越繁忙, 因此阻塞概率增加。此外, 随机信道选择方案的阻塞概率增加最快, 而基于混合频谱切换的信道选择策略中的阻塞概率增加最慢。

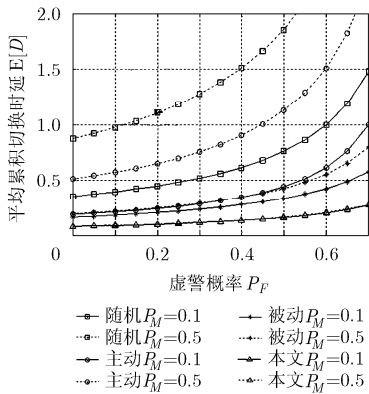


图 5 虚警概率对次用户累积切换时延的影响

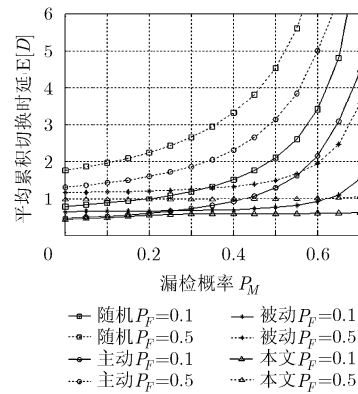


图 6 漏检概率对次用户累积切换时延的影响

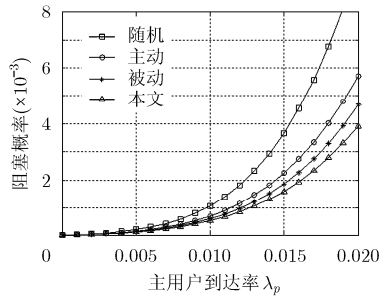


图7 主用户的到达率对阻塞概率的影响

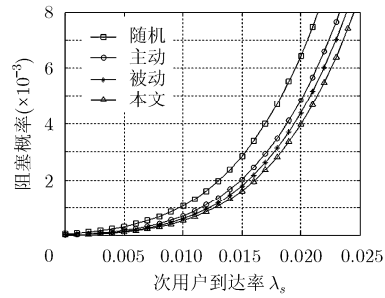


图8 次用户的到达率对阻塞概率的影响

6 结束语

针对主动频谱切换中预先确定的目标信道存在更新的问题, 本文提出一种基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法。综合考虑次用户的多次中断、主用户的到达率和非理想检测问题, 寻找累积切换时延最小的信道作为次用户最优的目标信道。当次用户切入预先确定的目标信道需要等待时, 立即进行频谱感知。取感知时间和等待时间的最小值作为次用户的切换时延, 所对应的信道为真正的目标信道。仿真结果表明, 与随机信道选择策略和基于主动和被动频谱切换的信道选择策略相比较, 本文提出的基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法的累积切换时延更小, 受漏检概率和虚警概率的影响更小, 并且信道的阻塞概率略有降低。这充分体现了该目标信道选择算法的优势。

参考文献

- [1] MA Bin and XIE Xianzhong. PSHO-HF-PM: an efficient proactive spectrum handover mechanism in cognitive radio networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 79(3): 1-23.
- [2] PUSHUP M and AWADHESH K S. A survey on spectrum handoff techniques in cognitive radio networks[C]. 2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Mysore, 2014: 996-1001. doi: 10.1109/IC3I.2014.7019755.
- [3] WANG Chungwei and WANG Lichun. Spectrum handoff for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensing?[C]. IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, Austin, Texas, 2008: 343-348. doi: 10.1109/PCCC.2008.4745128.
- [4] WANG Chungwei, WANG Lichun, and CHANG Chungju. Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(9): 1499-1513. doi: 10.1109/TMC.2011.155.
- [5] ZHANG Lei, SONG Tiecheng, and WU Ming. Traffic-adaptive proactive spectrum handoff strategy for graded secondary users in cognitive radio networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 24(4): 1-8.
- [6] WANG Lichun and WANG Chungwei. Analysis of reactive spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(10): 2016-2028. doi: 10.1109/JSAC.2012.121116.
- [7] ZHANG Y. Spectrum handoff in cognitive radio networks: opportunistic and negotiated situations[C]. IEEE International Conference on Communications, Dresden, 2009: 1-6. doi: 10.1109/ICC.2009.5199479.
- [8] ZHENG Shilian and YANG Xiaoni. Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12): 1332-1334. doi: 10.1109/LCOMM.2011.102611.111603.
- [9] XIAO Qinghai, LI Yunzhou, ZHAO Ming, et al. Opportunistic channel selection approach under collision probability constraint in cognitive radio systems[J]. *Computer Communications*, 2009, 32(18): 1914-1922.
- [10] FATEMEH S and MASOUMEH N. Optimal probabilistic initial and target channel selection for spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(1): 570-584. doi: 10.1109/TWC.2014.2354407.
- [11] WANG Lichun, WANG Chungwei, and CHANG Chungju. Optimal target channel sequence design for multiple spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(9): 2444-2455. doi: 10.1109/TCOMM.2012.070912.100661.
- [12] WU Yeqing, HU Fei, SUNIL K, et al. A learning-based QoE-driven spectrum handoff scheme for multimedia transmissions over cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(11): 2134-2148. doi: 10.1109/JSAC.2014.141115.
- [13] WANG Lichun, WANG Chungwei, and ADACHI Fumiaki. Load-balancing spectrum decision for cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4): 757-769. doi: 10.1109/JSAC.2011.110408.
- [14] LI Xiukui and SEYED A. Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, 2008: 894-899. doi: 10.1109/WCNC.2008.163.

马彬: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为异构无线网络、认知无线网络等。
包小敏: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为认知无线网络、频谱切换等。
谢显中: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信网络、认知无线电技术等。