



一种基于切换失败概率和认知用户信道容量联合优化的访问策略

许蒙迪, 金明, 童景文

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 现有频谱切换信道访问策略主要考虑切换失败概率, 而较少考虑认知用户的信道容量。针对这一问题, 提出了一种基于切换失败概率和认知用户信道容量联合优化的频谱切换信道访问策略。首先证明了按信噪比降序访问可以得到最大的认知用户信道容量, 而按信道平均空闲时间降序访问可以得到最低切换失败概率。接着提出对信道平均空闲时间和信噪比进行排序并加权合并的非参数化处理。最后, 按非参数化处理结果降序进行信道访问。结果表明, 所提方法能够在切换失败概率接近最低的情况下, 使认知用户信道容量提升50%左右。

关键词: 认知无线电; 频谱切换; 信道访问策略; 信道容量

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016217

A channel visiting strategy based on joint optimization of probability of handoff failure and capacity of secondary user

XU Mengdi, JIN Ming, TONG Jingwen

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The available channel visiting strategy for spectrum handoff mainly considers the probability of handoff failure more than the channel capacity. Aiming at the problem, a novel spectrum switching channel visiting strategy was proposed based on the probability of handoff failure and the channel capacity joint optimization of secondary user. It was proved that the maximum channel capacity of secondary user can be obtained by visiting the channel in the descending order of the signal to noise ratio (SNR), and the minimum probability of handoff failure could be obtained in the descending order of the mean vacant time duration. Then the mean vacant time of channel and SNR for sorting and weighted combination was processed of non-parameterization. At last, the channel was visited in descending order according to the result of non-parametric processing. The numerical results show that the proposed method can increase the channel capacity of secondary user by about 50%, while keeping the probability of handoff failure close to the minimum.

Key words: cognitive radio, spectrum handoff, channel visiting strategy, channel capacity

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61301152, No.61571250); 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2016A610058); 浙江省信息与通信工程重中之重学科开放基金资助项目 (No.xkx11402)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61301152, No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation of China (No.2016A610058), Zhejiang Open Foundation of the Most Important Subjects of Information and Communication Engineering (No.xkx11402)

1 引言

随着无线通信技术的不断发展,人们对无线电频谱的需求越来越大,而现存的可用频谱资源是有限的,这导致频谱资源缺乏的问题日益严重^[1]。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的一份研究报告表明,70%的已分配频谱没有得到充分利用,频谱利用率低下与频谱资源匮乏相矛盾^[2]。为了提高频谱利用率,频谱管理者开始采用动态频谱管理方案,而认知无线电(cognitive radio, CR)技术被认为是实现动态频谱管理的一种主流方案^[3]。认知无线电的关键功能之一就是找出频谱空闲,分配给认知用户使用,从而提高频谱利用率。当授权用户接入被认知用户占用的信道时,认知用户要及时退出并寻找新的信道建立连接,以避免对授权用户造成干扰,这一过程称为频谱切换^[4]。频谱切换所用的时间越少、切换失败的概率越小,则频谱利用率越高,认知用户的整体性能越高。

在目前的频谱切换技术中,认知用户的频谱切换方式分为先应式频谱切换和反应式频谱切换^[4,5]。先应式频谱切换中,认知系统对授权用户的活动进行预测,在授权用户没有接入目标频谱并且即将接入的时候就开始进行频谱切换;反应式频谱切换中,认知系统在检测到授权用户接入目标频谱后才开始进行频谱切换。另外根据认知系统进行频谱切换时选择目标信道的时刻,可以将频谱切换分为先应式决策频谱切换和反应式决策频谱切换^[6]。先应式决策频谱切换中,目标信道在频谱切换之前就已经准备好;而反应式决策频谱切换中,目标信道是根据即时频谱感知结果得到的。在目前的频谱切换算法中,主要研究的是频谱切换时间^[7]和频谱切换失败概率^[8]。参考文献[4]研究了反应式频谱切换算法,利用排队理论从认知用户频谱利用率和频谱切换时间出发进行了优化研究,但没有考虑频谱切换失败概率。参考文献[5]研究了先应式频谱切换算法,与反应式相比减少了与授权用户产生冲突的概率,但没有考虑频谱切换时间。参考文献[9]假设信道空闲时间服从指数分布,分析得到按信道平均空闲时间递减的顺序进行频谱切换能使切换失败概率最小。在此基础上,参考文献[10]进一步考虑信道空闲时间服从均匀分布、Rayleigh 分布以及 Weibull 分布情况下的最小切换失败概率,并且加入了对信道空闲时间存在估计误差情况的数值分析。

如果认知用户的信道容量很小,那么即使切换失败概

率很低,也无法给认知用户提供有效的资源。因此,在频谱切换过程中,认知用户的信道容量也是一个需要考虑的重要因素。现有的频谱切换信道访问策略较少考虑认知用户的信道容量^[11,12]。针对这一问题,综合考虑了频谱切换失败概率和认知用户信道容量。为了降低二维搜索的计算量,通过对信道平均空闲时间和信噪比进行排序并加权合并的非参数化处理,从而把二维联合优化降为了一维优化问题。最后的仿真结果表明,所提方法能够在切换失败概率接近最低的情况下,使认知用户信道容量提升50%左右。

2 频谱切换模型

考虑先应式决策频谱切换策略,假设在频谱切换时共有 M 个空闲信道可供认知用户进行选择,第 $m(m=1,2,\dots,M)$ 个信道的带宽为 B_m 。由于这 M 个信道的状态信息是不同的,所以认知用户在正式通信之前必须进行握手,以设置相应的通信参数(如调制阶数等)。假设认知用户一次握手所需的时间为 T_s 。若在认知用户握手的过程中授权用户重新接入这一信道,则本次握手失败。另外,为了简化认知用户通信的复杂度,假设认知用户以时间间隔 T 访问和接入每个信道。如果某个信道访问和接入失败,则尝试下一个信道的访问和接入,直到访问成功或所有信道都失败为止。上述的访问过程如图 1 所示。

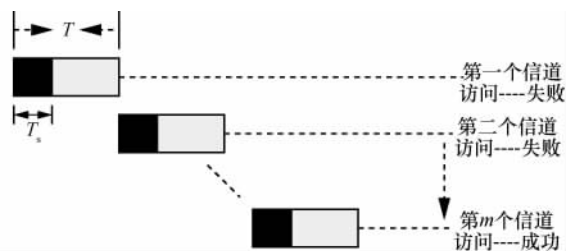


图 1 信道访问过程示意

假设授权用户到达过程为泊松过程^[9],第 m 个信道中授权用户在单位时间内的平均到达速率为 λ_m ,则授权用户出现的时间服从参数为 λ_m 的指数分布,其概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} x e^{-\lambda_m x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

在信道访问时,若有一个信道访问成功,那么本次频谱切换成功;若所有信道访问均失败,则本次频谱切换失败。可以得到认知用户访问第 m 个信道时失败的概率(即



在 $(m-1)T_s$ 时长内出现授权用户的概率)为:

$$p_{\text{fail},m} = 1 - e^{-\lambda_m((m-1)T_s + T_s)} \quad (2)$$

则频谱切换失败的概率 (即所有 M 个信道都访问失败)为:

$$\prod_{m=1}^M p_{\text{fail},m} = \prod_{m=1}^M (1 - e^{-\lambda_m((m-1)T_s + T_s)}) \quad (3)$$

频谱切换过程中,假设所有可能的信道访问顺序构成集合 $\{v=[v_1, v_2, \dots, v_M]\}$,其中, v_m 是正整数,表示信道的访问序号,例如 $v_1=4, v_2=1, \dots, v_M=9$,则说明先访问第4个信道,若失败再访问第1个信道,依此类推,最后访问第9个信道。现在共有 M 个可供访问的信道,那么集合 $\{v\}$ 中的元素共有 $M!$ 种。只考虑频谱切换失败概率最小的情况时,信道访问顺序的优化问题可以表示为:

$$v_{\text{opt}} = \min_{v_{\text{opt}} \in \{v\}} \prod_{m=1}^M (1 - e^{-\lambda_m((m-1)T_s + T_s)}) \quad (4)$$

其中, v_{opt} 为使频谱切换失败概率最小的信道访问顺序。

实际过程中,除了考虑频谱切换失败概率,认知用户的信道容量也是影响频谱切换性能的重要因素,而信道容量又与信噪比有关。通过把认知用户在各信道的信噪比作为另一信道访问顺序的参考量,进行认知用户信道容量和频谱切换失败概率的联合优化。

3 基于切换失败概率和认知用户信道容量联合优化的访问策略

3.1 基于认知用户信道容量的频谱切换信道访问策略

假设认知用户在第 v_m 个访问信道的信噪比为 SNR_{v_m} 。若第 v_m 个信道访问成功,则认知用户的信道容量为:

$$C_m = \begin{cases} (1 - p_{\text{fail},v_1}) B_{v_1} \lg(1 + SNR_{v_1}), & m=1 \\ \left(\prod_{i=1}^{m-1} p_{\text{fail},v_i} \right) (1 - p_{\text{fail},v_m}) B_{v_m} \lg(1 + SNR_{v_m}), & 2 \leq m \leq M \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\prod_{i=1}^{m-1} p_{\text{fail},v_i}$ 表示前 $m-1$ 次访问都失败的概率。令:

$$A_m = \begin{cases} (1 - p_{\text{fail},v_1}) B_{v_1}, & m=1 \\ \left(\prod_{i=1}^{m-1} p_{\text{fail},v_i} \right) (1 - p_{\text{fail},v_m}) B_{v_m}, & 2 \leq m \leq M \end{cases} \quad (6)$$

则信道容量可以表示为:

$$C_m = A_m \lg(1 + SNR_{v_m}) \quad (7)$$

那么在给定信道访问顺序的情况下,频谱切换成功后

认知用户获得的遍历信道容量为:

$$\bar{C} = \sum_{m=1}^M C_m \quad (8)$$

考虑认知用户遍历信道容量最大的情况,信道访问顺序的优化问题可以表示为:

$$v_{\text{opt}} = \max_{v_{\text{opt}} \in \{v\}} \bar{C} \quad (9)$$

下面寻找式(9)的最优解。不失一般性,假设各信道的平均空闲时间相同,且各信道的带宽 B_m 也一样,令 $B_m=B$ 。由式(2)可得:

$$p_{\text{fail},v_1} < p_{\text{fail},v_2} < \dots < p_{\text{fail},v_M} \quad (10)$$

因此:

$$\begin{aligned} A_1 - A_2 &= (1 - p_{\text{fail},v_1})B - p_{\text{fail},v_1}(1 - p_{\text{fail},v_2})B \\ &> (1 - 2p_{\text{fail},v_1} + p_{\text{fail},v_1}^2)B \\ &= (1 - p_{\text{fail},v_1})^2 B \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中第一个不等式利用了 $p_{\text{fail},v_2} > p_{\text{fail},v_1}$ 。另外,当 $2 \leq m \leq M$ 时:

$$\begin{aligned} A_{m-1} - A_m &= \prod_{i=1}^{m-2} p_{\text{fail},v_i} (1 - p_{\text{fail},v_{m-1}})B - \prod_{i=1}^{m-1} p_{\text{fail},v_i} (1 - p_{\text{fail},v_m})B \\ &= \prod_{i=1}^{m-2} p_{\text{fail},v_i} [(1 - p_{\text{fail},v_{m-1}})B - p_{\text{fail},v_{m-1}}(1 - p_{\text{fail},v_m})B] \\ &> \prod_{i=1}^{m-2} p_{\text{fail},v_i} (1 - 2p_{\text{fail},v_{m-1}} + p_{\text{fail},v_{m-1}}^2)B \\ &= \prod_{i=1}^{m-2} p_{\text{fail},v_i} (1 - p_{\text{fail},v_{m-1}})^2 B \\ &> 0 \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(11)和式(12)可得, A_m 是一个递减序列,即 $A_1 > A_2 > \dots > A_M$ 。

若认知用户信道访问一次便成功,则信道容量为 $C_1 = A_1 \lg(1 + SNR_{v_1})$,当 SNR_{v_1} 最大时,能使 C 达到最大值。所以第一次必定访问信噪比最大的信道,这样能使信道容量 C_1 最大。以此类推,第 m 次必定访问信噪比第 m 大的信道,这样能使信道容量 C_m 最大。于是得到按信噪比由高到低的顺序进行信道访问,能使每次访问成功后信道容量最大,即能使遍历信道容量最大。下面用反例证明上述结论。任意交换两个信道访问顺序,则有:

$$\begin{cases} C'_m = A_m \lg(1 + SNR_{m+1}) \\ C'_{m+1} = A_{m+1} \lg(1 + SNR_m) \end{cases} \quad (13)$$

与按照信噪比由高到低的顺序访问相比,信道容量之差为:

$$\begin{aligned} & C_m + C_{m+1} - C'_m - C'_{m+1} \\ &= A_m \ln \left(\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \right) - A_{m+1} \ln \left(\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \right) \\ &= (A_m - A_{m+1}) \ln \left(\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

因为 $A_m - A_{m+1} > 0$, 且 $\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \geq 1$, 即 $\ln \left(\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \right) \geq 0$, 所以有:

$$(A_m - A_{m+1}) \ln \left(\frac{1 + \text{SNR}_m}{1 + \text{SNR}_{m+1}} \right) > 0 \quad (15)$$

即:

$$C_m + C_{m+1} > C'_m + C'_{m+1} \quad (16)$$

从式(16)可得,交换信道访问顺序后信道容量之和会变小,即遍历信道容量会变小,故在其他条件相同的情况下,按照信噪比递减的顺序进行信道访问,频谱切换成功后能使认知用户有最大遍历信道容量。

3.2 联合切换失败概率和认知用户信道容量的访问策略

通过分析得到,按平均空闲时间递减的顺序访问信道可以减小频谱切换失败概率,而按信噪比递减的顺序访问信道可以增大认知用户的信道容量。在实际中既希望降低切换失败概率,同时又希望提高认知用户的信道容量。而一般按照平均空闲时间和信噪比递减的信道访问顺序是不一致的。这使得上述两者性能无法同时提升。因此有必要提出一种有效的方法,以满足实际应用的需求。考虑到信道平均空闲时间和信噪比是两个不同量纲的指标,采用非参数化处理方法。

假设各信道的平均空闲时间为 $t = [t_1, t_2, \dots, t_M]$, 认知用户在各信道的信噪比为 $\text{SNR} = [\text{SNR}_1, \text{SNR}_2, \dots, \text{SNR}_M]$ 。对 t 和 SNR 中的各元素进行非参数化处理,得到新序列 $\hat{t} = [\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_M]$ 和 $\widehat{\text{SNR}} = [\widehat{\text{SNR}}_1, \widehat{\text{SNR}}_2, \dots, \widehat{\text{SNR}}_M]$ 。例如 t 中有 $t_3 < t_2 < t_5 < \dots$, 则 $\hat{t}$ 中的元素分别为 $\hat{t}_3=1, \hat{t}_2=3, \hat{t}_5=3 \dots$, 对 SNR 中的元素也做同样处理得到 $\widehat{\text{SNR}}$ 。

在考虑信道访问顺序时,假设信道平均空闲时间的参考权重为 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$, 认知用户信噪比的参考权重为 $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$, 且 $\alpha + \beta = 1$, 得到各信道的加权指标为:

$$T_{\text{test}} = [T_{\text{test},1}, T_{\text{test},2}, \dots, T_{\text{test},M}] \quad (17)$$

其中, $T_{\text{test},m} = \alpha \hat{t}_m + \beta \widehat{\text{SNR}}_m$ 。

由前面的证明得到,为了得到最小的切换失败概率和最大的信道容量,需要分别按照平均空闲时间和信噪比降序的方法访问信道。因此,在进行信道访问时按照 T_{test} 中元素递减的顺序进行信道访问。

4 仿真分析

通过数值仿真来对所提的频谱切换信道访问策略做进一步分析。假设待访问信道的个数为 $M=10$, 信道访问时间间隔为 $T=30$ ms, 频谱空穴信息确认时间为 $T_s=10$ ms。不失一般性,假设各信道的平均空闲时间 t 在 (20 ms, 200 ms) 服从均匀分布, 认知用户在各个信道的信噪比 SNR 在 (0, 20) 服从均匀分布。

4.1 实验 1

考虑不同权重下的频谱切换失败概率和遍历信道容量。如图 2 所示为不同权重下的频谱切换失败概率和遍历信道容量。由图 2 可知,若按参考文献[9]和参考文献[10]中的频谱切换策略进行信道访问(即信道平均空闲时间权重为 1、信噪比权重为 0),虽然能使系统有较降低频谱切换失败概率,但在频谱切换成功后会使遍历信道容量较小。从图 2 中可以看出,信道平均空闲时间权重为 0.5(信噪比权重为 0.5)时,有较大的遍历信道容量的同时,能使系统保持较低的频谱切换失败概率水平。此时,遍历信道容量与随机顺序访问情况相比提升了 50% 左右,而频谱切换失败概率远远小于随机访问顺序时的概率。所以,提出的频谱切换信道访问策略能够实现频谱切换失败概率和认知用户信道容量的联合优化。

图 3 比较了本文方法、参考文献[9]方法和随机访问顺序 3 种方法在不同平均信噪比下的遍历信道容量。仿真中的平均信噪比从 10 dB 增加到 19 dB。仿真结果表明本文方法相比参考文献[9]的方法,信道容量提升了 50% 左右。另外,从图 3 中可以看出,参考文献[9]方法和随机访问顺序得到的信道容量接近。这是因为参考文献[9]在设计访问顺序时没有考虑信噪比,使得从信噪比的角度看,其访问顺序与随机访问顺序是相同的。

4.2 实验 2

考虑信道平均空闲时间存在估计误差的情况。图 4 给出了信道平均空闲时间权重分别为 0.3、0.5、0.7 和 1 时的频谱切换失败概率。当信道平均空闲时间权重为 1(即信噪比权重为 0)时,即不考虑信噪比对信道访问顺序的影响,本文方法将退化为参考文献[9]的方法,即参考文献[9]

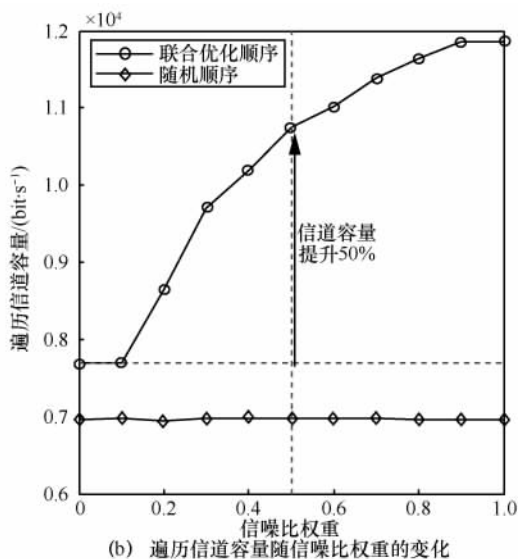
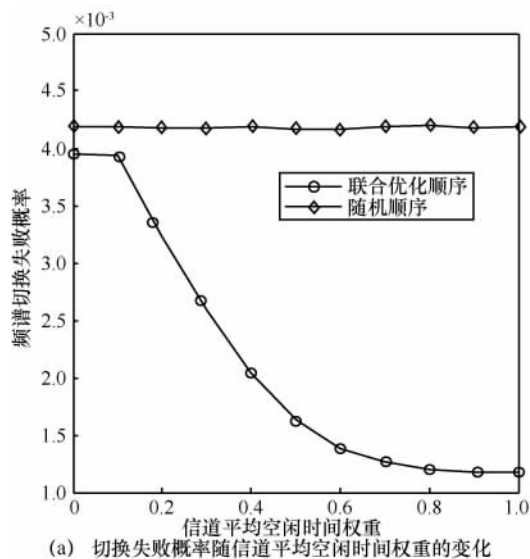
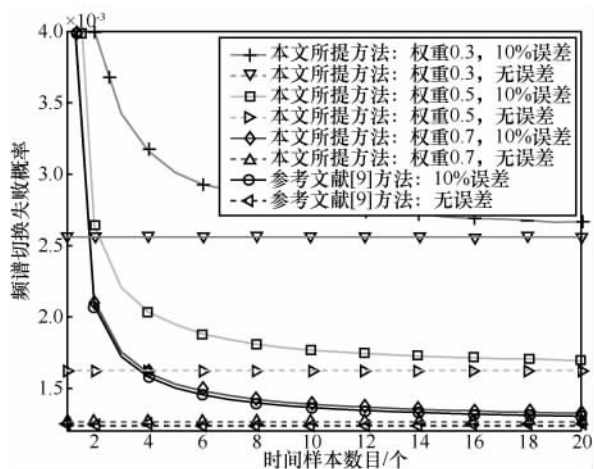
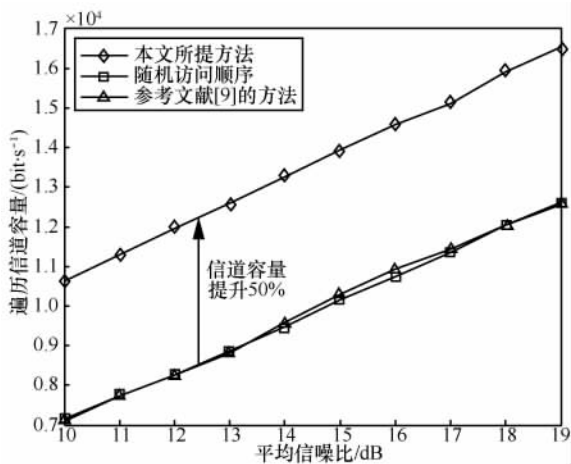


图2 不同权重时的频谱切换失败概率和遍历信道容量



方法是本文方法的一个特例。在信道平均空闲时间服从指数分布的情况下,频谱切换失败概率随时间样本数目的变化如图4所示。由图4可得,随着信道平均空闲时间权重的增加,频谱切换失败概率越来越小。当存在估计误差时,保持信道平均空闲时间的权重不变,通过增加信道平均空闲时间观测样本数目,可以使实际频谱切换失败概率接近于无估计误差下的情况。另外,本文方法和参考文献[9]方法的频谱切换失败概率均小于1%。当信道平均空闲时间权重较大时,本文方法与参考文献[9]的方法频谱切换失败概率非常接近。

由式(5)可知,频谱切换失败概率会影响认知用户的信道容量,所以本实验同时考虑平均空闲时间存在估计误差时对认知用户信道容量的影响,得到认知用户信道容量随时间样本数目的变化,如图5所示。由图5可得,随着信道平均空闲时间权重的增加,遍历信道容量越来越小,通过增加空闲时间的样本数目,可以有效减少空闲时间估计误差对认知用户遍历信道容量的影响。另外可以看出,本文方法和参考文献[9]方法都能够随时间样本数目增加快速收敛。然而本文方法的信道容量要大于参考文献[9]方法的信道容量。

4.3 实验3

考虑信噪比存在估计误差的情况。由前面分析可得,信噪比存在估计误差只影响信道容量而不会影响频谱切换失败概率,所以本实验只需考虑信道容量随信噪比样本数目的变化情况。当信道平均空闲时间服从指数分布,信噪比估计误差分别为5%和10%时,信道容量随样本数目

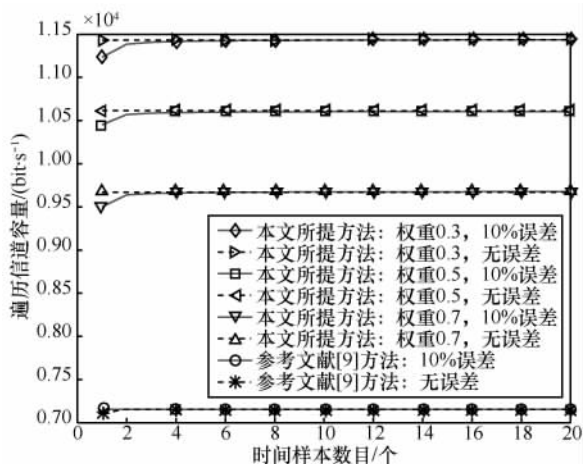


图5 不同权重时的遍历信道容量随时间样本的变化

的变化具体如图6所示。由图6可得,当信噪比估计误差较小时,不会对遍历信道容量产生较大的影响;当信噪比估计误差增加时,通过增加信噪比估计样本的数目可以减少估计误差对遍历信道容量的影响。

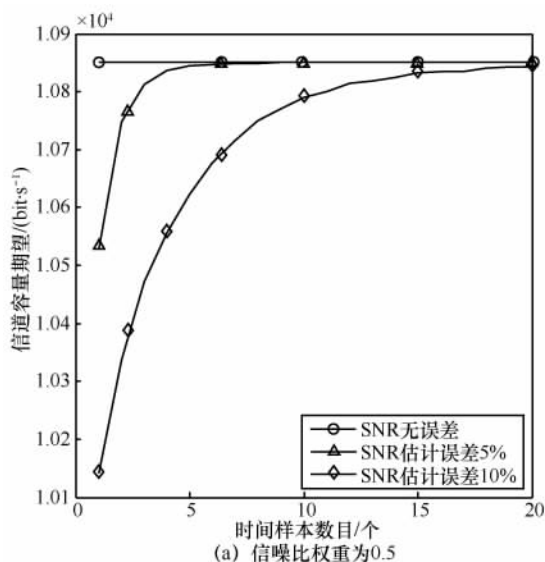
5 结束语

针对认知无线电先应式决策频谱切换,提出了一种基于切换失败概率和认知用户信道容量联合优化的信道访问策略。通过联合考虑信道平均空闲时间和各信道的信噪比来确定信道访问顺序,并分析了估计误差对系统性能的影响。仿真结果显示,所提信道访问策略能联合优化系统频谱切换失败概率和认知用户的信道容量,从而提高认知系统的整体性能。理论分析和仿真结果都表明,当时间样

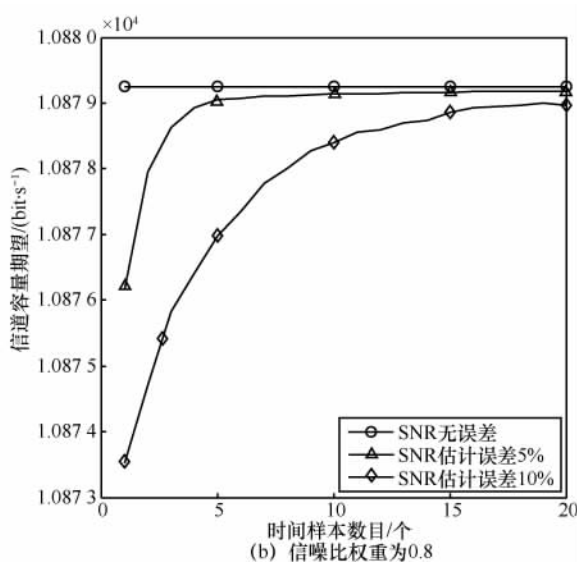
本数目较大时,信道平均空闲时间估计误差对系统性能的影响较小;认知用户信道的信噪比估计误差小于5%时,信噪比估计误差对认知无线电系统的性能影响较小。与传统方法相比,本文方法在保持频谱切换失败概率较低的同时,使得信道容量提升了50%左右。

参考文献:

- [1] MARTIN L, WOLFGANG R, ERNST-OLAV. Spectrum allocation and its relevance for competition[J]. Telecommunications Policy, 2012, 36(8): 664-675.
- [2] WU C, HE C, JIANG L, et al. Optimal channel sensing sequence design for spectrum handoff [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 353-356.
- [3] GAVRILOVSKA L, ATANASOVSKI V, MACALUSO I, et al. Learning and reasoning in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1-17.
- [4] WANG C, WANG L. Analysis of reactive spectrum handoff in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(10): 2016-2028.
- [5] SONG Y, XIE J. Prospect: a proactive spectrum handoff framework for cognitive radio Ad Hoc networks without common control channel[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(7): 1127-1139.
- [6] WANG L, WANG C. Spectrum handoff for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensing [C]/IEEE International Performance Computing and Communications Conference, December 7-9, 2008, Texas, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 343-348.



(a) 信噪比权重为0.5



(b) 信噪比权重为0.8

图6 信噪比估计存在误差时,不同信噪比样本数目下认知用户的遍历信道容量



- [7] BICEN A, PEHLIVANOGLU E, GALMES S, et al. Dedicated radio utilization for spectrum handoff and efficiency in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013(99): 1-9.
- [8] MA Z, WANG H. Dynamic spectrum handoff scheme based on queuing theory in cognitive radio networks [C]//The 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), September 21-23, 2012, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [9] ZHENG S, YANG X, CHEN S, et al. Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12): 1332-1334.
- [10] 郑仕链, 杨小牛. 认知无线电频谱切换目标信道访问策略[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2213-2217.
ZHENG S L, YANG X N. Target channel visiting scheme for spectrum handoff in cognitive radio[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(9): 2213-2217.
- [11] TUMULURU K, WANG P, NIYATO D, et al. Performance analysis of cognitive radio spectrum access with prioritized traffic[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61 (4): 1895-1906.
- [12] PIRMORADIAN M, ADIGUN O, POLITIS C. Adaptive spectrum opportunity access in cognitive radio networks [J]. Journal of Networks, 2013, 8(4): 747-754.
- [13] SHAH G A, AKAN O B. Performance analysis of CSMA-based opportunistic medium access protocol in cognitive radio sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 15(4): 4-13.
- [14] MEHRNOUSH M, FATHI R, VAKILI V T. Proactive spectrum

handoff protocol for cognitive radio Ad Hoc network and analytical evaluation [J]. IET Communications, 2015, 15 (9): 1877-1884.

[作者简介]



许蒙迪(1992-),男,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为认知无线电中的多用户接入技术等。



金明(1981-),男,博士,宁波大学信息科学与工程学院副教授,主要研究方向为认知无线电技术和阵列信号处理等。



童景文(1991-),男,宁波大学信息科学与工程学院硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱感知方法等。