



认知无线网络中基于信道感知排序的频谱切换^{*}

朱星宇¹, 周怀北², 黄俊园¹

(1. 武汉大学物理科学与技术学院 武汉 430072; 2. 武汉大学国际软件学院 武汉 430072)

摘要: 在认知无线网络中, 一旦主用户出现, 正在使用该频段的认知用户需退出该频段, 寻找另外一个空闲的频段继续未完成的传输, 这就是认知无线网络中的频谱切换。评价认知用户频谱切换性能有两个重要的参数: 切换时延和切换次数。本文提出了一种基于信道感知排序的频谱切换方法, 以同时减少切换时延和切换次数。在进行信道感知排序时, 本文使用的方法同时考虑了切换发生时信道空闲概率以及使用该信道时不再发生切换的概率。仿真结果表明, 与传统信道排序方法相比, 本方法的切换时延可以达到与传统方法一样的性能, 然而切换次数却大大地减少了。

关键词: 频谱切换; 切换时延; 切换次数; 信道感知排序

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.011

Spectrum Handoff with Channel Sensing Sequencing in Cognitive Radio Network

Zhu Xingyu¹, Zhou Huaibei², Huang Junyuan¹

(1. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the cognitive radio network, when the primary users show up, the secondary users should vacate the channel and find another free channel for data transmissions. This is the so-called spectrum handoff. There are two most important performance metrics for spectrum handoff: handoff delay and handoff times. A novel spectrum handoff scheme with channel sensing sequencing was proposed in order to decrease both handoff delay and handoff times. When designing the channel sensing sequence, the channel free probability was considered, and the probability that no handoff will happen in a channel was considered as well. The simulation results show that the method not only can get the minimum handoff delay as the traditional method does, but also can decrease the handoff times were significantly compared with the traditional method.

Key words: spectrum handoff, handoff delay, handoff times, channel sensing sequencing

1 引言

目前无线网络所采用的静态频谱分配方案使得频谱利用效率低下。为了增加频谱利用率, FCC 提议使用认知

无线网络(CRN), 实现对频谱的动态分配。在认知无线网络中, 主用户(PU)可以随时随地接入无线网络, 认知用户(SU)可以机会式地接入未被主用户使用的频段。当主用户出现在该频段, 认知用户感知到主用户的出现并立即退

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2009CB320401)



出该频段,切换到另外一个空闲的频段继续未完成的传输,这就是频谱移动性。频谱移动性是认知无线网络的重要功能之一,其在认知无线网络中引入了一种新的切换——频谱切换^[1]。在频谱切换的过程中,认知用户需要感知其他的频段,在空闲的频段中选择一个最佳的频段进行切换,因此频谱切换的性能很大程度上取决于频谱选择。

对于基于信道预测的频谱选择和切换已经有较多的研究^[2-8]。其中,为了减少频谱感知时间所导致的切换时延(handoff delay, HD),参考文献[2~4]提出了一种信道感知排序的方法,即当主用户出现时,认知用户根据最优序列对信道进行顺序感知,并选择第一个空闲信道作为目标信道。本文提出一个新的信道感知排序方法,其目标是同时减少感知时间和切换次数,在进行信道感知排序时,本文使用的方法同时考虑了切换发生时的信道空闲概率以及使用该信道时不再发生切换的概率。仿真结果表明,与上述信道排序方法相比,该方法可以减少切换次数,提高频谱切换的性能。

2 系统模型

2.1 信道模型

信道模型被模拟为一个在 On 态和 Off 态间变换的过程。On 态表示该信道正在被主用户占用,Off 态表示该信道是空闲的,认知用户可以利用这个空闲期进行传输。主用户的到达和离开都服从泊松分布,到达率和离开率为 λ_i 和 μ_i ,那么 On 期和 Off 期的长度 T_{on}^i 和 T_{off}^i 则服从指数分布,其均值分别为 μ_i^{-1} 和 λ_i^{-1} ,这里 i 表示第 i 个信道。那么信道利用率可以表示为 $\mu_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$ ^[2,4,9]。用 $S^i(t)$ 表示信道 i 在时刻 t 的状态,那么当信道 i 被主用户占用(On)时, $S^i(t)=1$; 当该信道为空闲(Off)时, $S^i(t)=0$ 。

2.2 网络和感知模型

本文假设认知网络有一个中心网络实体,如基站。网络中有 M 个认知用户,总共有 N 个信道供主用户和认知用户进行数据传输,另外,认知用户还共同拥有一个感知导频信道(cognitive pilot channel, CPC)^[10],认知用户可以使用该信道与基站进行信息交互。并假设认知用户不能同时进行数据传输和感知,即当它感知一个信道时,必须停止传输。

这里提出了一个新的合作式感知模型。所有的信道仍

然需要被周期性地感知,但不是所有的认知用户都需要进行周期性的频谱感知,只有那些没有数据传输的认知用户才进行周期性感知,有数据传输的认知用户将不间断地进行数据传输直到主用户出现。只要有一个认知用户感知到信道 i 为繁忙,基站便判定该信道为繁忙。这些信道信息会在基站中保存起来,作为信道的历史状态统计信息,认知用户可以通过 CPC 向基站获得这些信息。参考文献[11]中证明了,在合作式频谱感知中,不需要所有的认知用户感知同一个信道,只需要 m ($1 \leq m \leq M$) 个认知用户。

图 1 描述了网络模型。SU1 和 SU4 没有数据传输,它们周期性地感知所有信道,并将感知信息通过 CPC 发送给基站。SU3 和 SU4 在进行数据传输,当它们需要进行频谱切换时,可以通过 CPC 向基站获取信道信息,从而决定最优信道感知序列,以尽快找到一个较好的空闲频段进行切换。

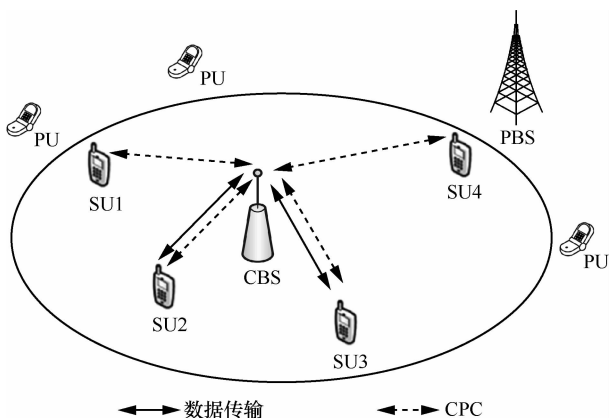


图 1 网络模型

3 信道感知排序模型

3.1 频谱切换时延最小的信道感知排序

在认知无线网络中,当认知用户的数据传输被主用户干扰时,它们必须找到另外一个空闲频谱进行频谱切换,所以,认知用户的切换时延很大程度上取决于频谱感知时延,即找到一个空闲频谱所需要的感知时间。假设认知用户一次只能感知一个信道,那么它们需要一个接一个地感知剩下的个信道,直到找到一个空闲信道。

应用马尔可夫过程描述信道在 On 态和 Off 态之间的变换,信道状态转移模型如图 2 所示,每个信道拥有两种状态 $\{0,1\}$, 0 表示空闲,1 表示被使用。则状态转移概率如

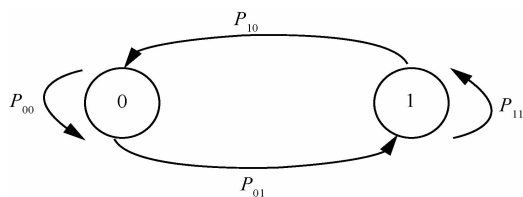


图 2 信道状态转移模型

式(1)所示:

$$P_{kl}^i(\Delta t) = P\{S^i(t + \Delta t) = l | S^i(t) = k\} \quad (1)$$

式(1)表示信道 i 从时刻 t 的状态 k 转移到时刻 $t + \Delta t$ 的状态 l 的概率, $k, l \in \{0, 1\}$ 。

假设信道 i 在时刻 $t + \Delta t$ 需要进行频谱切换, 最近的信息是在时刻 t 感知到的, 那么信道 i 在时刻 $t + \Delta t$ 的空闲概率如式(2)所示:

$$P_{\text{idle}}^i = \begin{cases} P_{10}^i(\Delta t), & S^i(t) = 1 \\ P_{00}^i(\Delta t), & S^i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由于信道具有指数分布的 On/Off 周期, 使用马尔可夫链可以得到式(3)和式(4)^[3,9]:

$$P_{00}^i(\Delta t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \quad (3)$$

$$P_{10}^i(\Delta t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)\Delta t} \quad (4)$$

其中, Δt 是上一次感知结果到频谱切换发生时的时间间隔。当一个认知用户的数据传输被到达的主用户打扰时, 它便向基站获取信道参数 λ_i 和 μ_i 以及最近一次的信道感知结果 $S^i(t)$, 从而可以得到此时的信道空闲概率 P_{idle}^i , 那么它便可以根据 P_{idle}^i 的降序依次感知剩余的 $N-1$ 个信道, 然后接入第一个被感知到是空闲的信道。这种信道感知办法可以有效减少找到可切换信道所需的感知时间。

然而, 这种方法没有考虑信道容量, 拥有最大空闲概率的信道不一定是最优目标信道, 若该信道的质量不好, 选择该信道将造成认知用户频繁地进行频谱切换, 造成切换次数的增加。图 3 描述了这个问题的。首先, 认知用户在信道 1 上进行数据传输, 当数据传输被到来的主用户打扰, 它可以切换到信道 2 或 3 继续未完成的数据传输。假设切换发生时, 算得信道 2 的空闲概率 $P_{\text{idle}}^2 = 0.9$, 信道 3 的空闲概率 $P_{\text{idle}}^3 = 0.7$; 然而认知用户在信道 3 上的传输速率是信道 2 的两倍, 即 $R_3 = 2R_2$; 且事实上信道 2 和 3 在切换发生时都是空闲的。那么, 当切换发生时, 若按 P_{idle}^i 的降序依次感知信道, 信道 2 将被选择, 这时在数据传输完成之前传输将会被再一次打扰, 频谱切换又会发生; 如果选择信道 3, 由于

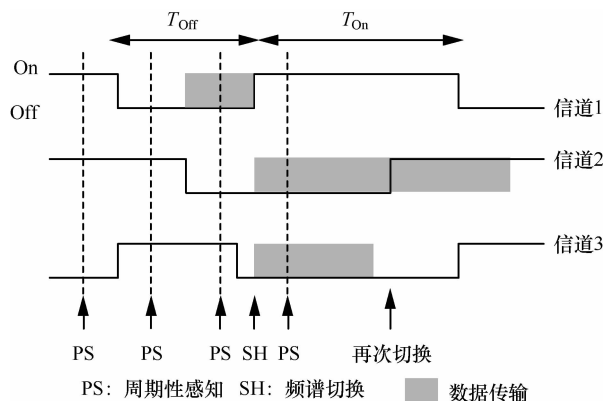


图 3 用户在切换发生时选择不同信道的不同结果

其传输速率很高, 数据传输可以在信道变成忙之前完成。显然信道 3 将是更好的目标信道。

3.2 新的信道感知排序方法

一个好的频谱切换决策应该可以同时降低切换时延和切换次数。假设一个认知用户需要传输的数据的总长度为 L_0 , 本文中只考虑频谱感知引起的切换时延且感知每个信道所用的时间一样。那么, 切换时延可以表示为 N_s, N_s 为切换发生时, 找到一个空闲信道所需要感知的总的信道数; 切换次数用 N_h 表示, 意思是在整个数据 L_0 传输期间切换发生的次数。所以, 目标是找到一个最优信道感知序列 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, 以最快的速度找到一个最佳的目标信道。该问题可以描述为式(5):

$$\text{Find } S = \arg \min N_s \& N_h \quad (5)$$

为了解决这个问题, 在进行信道排序时考虑一个新的参数 $P_i(T_i)$, 表示信道 i 的空闲期还能维持 T_i 这么长时间的概率。假设频谱切换发生时, 认知用户还剩下 L' 的数据需要传输, 信道 i 的传输速率为 R_i , 那么有:

$$T_i = \frac{L'}{R_i} \quad (6)$$

式(6)表示的是认知用户在信道上完成剩下的数据传输所需要的时间。

根据香农公式, 信道 i 的最大传输速率如式(7)所示:

$$R_i = B_i \times \log(1 + \text{SNR}_{\text{dB}}^i) \quad (7)$$

其中, $\text{SNR}_{\text{dB}}^i = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{signal}}^i}{P_{\text{noise}}^i} \right)$ 为信噪比, B_i 为信道带宽。

P_{noise}^i 是信道 i 上的背景噪声功率, 由于一般不能估算 P_{noise}^i 的即时值, 这里用平均值 $E(P_{\text{noise}}^i)$ 。另外, P_{signal}^i 可表示为式(8):

$$P_{\text{signal}}^i = P_t^i - L_i \quad (8)$$



其中, P_i 是信道 i 上的发射功率, 假设认知用户在每个信道上所用的发射功率一样, 那么上标 i 可以去掉。 L_i 是信道 i 上的路径损耗, 利用 Okumura-Hata 路径损耗模型 (城市地区)^[12], L_i 可以如式 (9) 所示:

$$\begin{aligned} L_i &= \alpha_i + \beta \lg d - \gamma \\ \alpha_i &= 69.55 + 26.16 \lg f_c^i - 13.82 \lg h_b \\ \beta &= 44.9 - 6.55 \lg h_b \\ \gamma &= 3.2 (\lg (11.755 4h_r))^2 - 4.97 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, d 是发射机和接收机间的距离, a 代表了信道中心频率 f_c^i 的影响, β 和 γ 分别代表了发射机和接收机高度的影响。所以, 拥有不同中心频率的信道将有不同的路径损耗。利用以上计算式, 可以预测各个信道上的信噪比 SNR_{ib}^i , 从而获得信道的传输速率 R_i 。

假设 T_{off}^i 服从指数分布, 如式 (10) 所示:

$$P(T_{\text{off}}^i \geq T_i) = e^{-\lambda_i T_i} \quad (10)$$

当认知用户切换到信道 i 时, 若信道 i 的空闲期已经持续了时间 t , 那么空闲期还能持续 T_i 的概率如式 (11) 所示:

$$P_i(T_i) = \frac{P(T_{\text{off}}^i \geq t + T_i)}{P(T_{\text{off}}^i \geq t)} = P(T_{\text{off}}^i \geq T_i) = e^{-\lambda_i T_i} \quad (11)$$

这也是认知用户切换到信道 i 后, 不再发生频谱切换的概率。

与之前提到的参考文献只考虑信道空闲概率 P_{idle}^i 不同, 本文提出的新的信道感知排序方法联合考虑概率 P_{idle}^i 和 $P_i(T_i)$, 即信道将以概率 $P_{\text{idle}}^i \cdot P_i(T_i)$ 的降序进行排列。利用这个新的信道感知排序方法, 可以一个较快的速度找到一个较好的目标信道, 同时减少感知时延和切换次数。

这里必须提到, 在一轮感知了所有 $N-1$ 个信道后, 可能没有找到一个空闲信道, 这时可以在等待时间 T_{retry} 后, 再对 $N-1$ 个信道进行感知。参数 T_{retry} 的设计不是本文要讨论的问题, 更多内容可以查看参考文献[3,4]。

信道感知排序方法可以总结为如下 6 步。

(1) 没有数据传输的认知用户周期性感知所有信道, 并将感知信息通过 CPC 发送给基站。

(2) 当某个认知用户的数据传输被主用户打扰, 它便通过 CPC 向基站获得信道的历史状态统计信息 λ_i 和 μ_i 及最近一次信道的感知信息 $S'(t)$ 。

(3) 认知用户计算概率 P_{idle}^i 和 $P_i(T_i)$ 。

(4) 认知用户按概率 $P_{\text{idle}}^i \cdot P_i(T_i)$ 的降序依次感知剩下的

$N-1$ 个信道, 并且切换到第一个感知为空闲的信道。

(5) 如果感知了所有 $N-1$ 个信道后没有找到一个空闲信道, 等待时间 T_{retry} 后, 从步骤 (3) 继续。

(6) 重复以上步骤直到总的服务完成。

4 仿真结果

本节讨论本文提出的信道感知排序方法的性能, 性能参数包括: 切换时延 $N_s T_s$ 和切换次数 N_h , 并且与参考文献[3]中的基于 P_{idle}^i 信道感知排序方法进行比较。使用 MATLAB 进行仿真, 每次测试运行 10 000 次, 最终取平均值。仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	取值
信道平均繁忙期 μ_i^{-1}	4~8 s
信道平均空闲期 λ_i^{-1}	4~8 s
信道可到达速率 R	0.5~1.5 MB/s
信道感知周期	1 s
T_{retry}	0.1 s
数据分组长度	6~18 MB

图 4 显示了 $N=16, 25$ 时的 N_s 值, 从图中可以看出, 对于所提的新的信道感知排序方法和参考文献[3]中的方法, N_s 随着信道数的增加而减小。这是因为随着信道数的增加, 可以有更多的空闲信道供选择, 所以对于两种排序方法来说, 信道越多, 越能快速地找到一个空闲信道。然而, 从图 4(a) 中可以看出, 当 $N=16$ 时, 本文所提方法的 N_s 比参考文献[3]的要高约 4%。然而从图 4(b) 中可以看出, 当 $N=25$ 时, 两种方法的 N_s 几乎是一样的。也就是说, 当主用户信道数较多时, 本文方法的感知时间与参考文献一样。在实际网络中, 认知用户需要感知较宽范围的频段, 所以在减少感知时延方面, 所提方法可以达到与文献方法一样好的效果。

图 5 显示了 $N=16, 25$ 时的 N_h 值。从图中可以看出, 对于两种方法, 切换次数都随着数据分组长度的增加而增加。然而, 显然本文的方法比参考文献中的方法表现得更出色。当 $N=16$ 时, 本文所提方法的切换次数 N_h 比参考文献[3]的要小大约 32%; 当 $N=25$ 时, 本文所提方法的切换次数 N_h 比参考文献的要小约 38%。可见, 随着信道个数的增

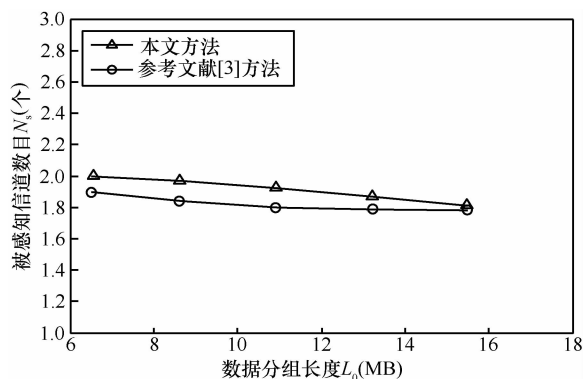
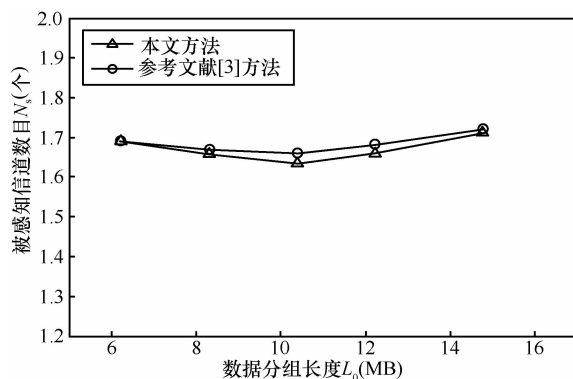
(a) $N=16$ (b) $N=25$

图4 切换时延随数据分组长度的变化曲线

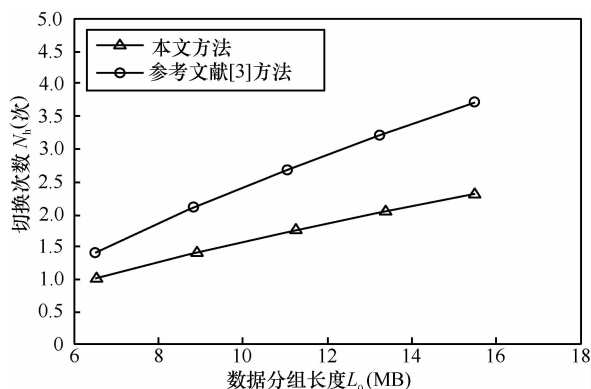
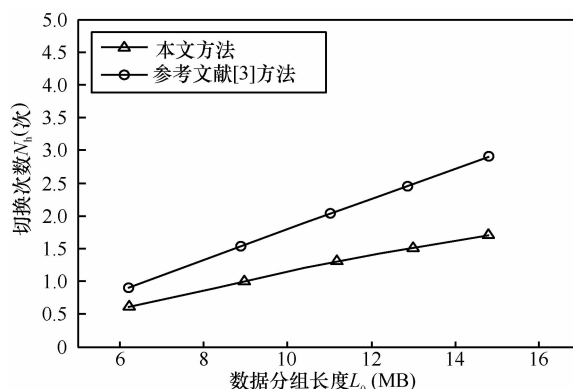
(a) $N=16$ (b) $N=25$

图5 切换次数随数据分组长度的变化曲线

加,参考文献[3]中的方法与本文所提方法的差别越来越大。这是因为信道越少,拥有最大 P_{idle}^i 的信道与拥有最大 $P_i(T_i)$ 的信道为同一信道的概率越大,参考文献[3]中的方法与本文所提方法的差别也就越小;相反的,信道越多,本文所提方法的增益越大,切换次数可以大大减少。

所以,总的来说,本文所提的信道感知排序方法在减少感知时延方面可以保持与传统排序方法一样好的效果;更重要的是,与传统方法比较,本文的方法可以大大地减少频谱切换次数。而且,随着信道个数的增加,本文所提方法的性能也越好。

5 结束语

在认知无线网络中,频谱移动会影响认知用户的QoS。而一个好的频谱切换方法应该可以同时降低切换时延和切换次数。为了达到这个目的,本文提出一个新的感知信道排序方法,与只考虑信道空闲概率的传统排序方法不同,该方法还考虑了该信道上不再发生切换的概率。模

拟结果显示,本文所提方法不仅可以保证最小的切换时延,切换次数相比传统方法大大减少,且本方法的性能增益随着信道个数的增加而增加。

参考文献

- 1 Akyildiz F, Vuran M C, Mohanty S. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4):40~48
- 2 Yuan G, Grammenos R, Yang Y. Performance analysis of selective opportunistic spectrum access with traffic prediction. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4):1949~1959
- 3 Shin K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with mac-layer sensing in cognitive radio networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533~545
- 4 Kim H, Shin K G. Fast discovery of spectrum opportunities in cognitive radio networks. Proceedings of 2008 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Chicago, Illinois, USA, 2008: 1~12



- 5 Qiao X, Tan Z, Ai B, *et al.* Spectrum handoff for cognitive radio systems based on prediction considering cross-layer optimization. IEICE Transactions on Communications, 2010, E93-B(12):3274~3283
- 6 Hoyhtya M, Pollin S, Mammela A. Performance improvement with predictive channel selection for cognitive radios. Proceedings of 2008 First International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, Aalborg, Denmark, 2008:1~5
- 7 Chen Y S, Cho C H, You I, *et al.* A cross-layer protocol of spectrum mobility and handover in cognitive LTE networks. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010,19(8):1723~1744
- 8 Ma R T, Hsu Y P, Feng K T. A POMDP-based spectrum handoff protocol for partially observable cognitive radio networks. Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, 2009:1~6
- 9 Zhao Q, Geirhofer S, Tong L, *et al.* Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 785~796
- 10 Perez-Romero J, Sallent O, Agusti R, *et al.* A novel on-demand cognitive pilot channel enabling dynamic spectrum allocation. Proceedings of 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, Ireland, 2007:46~54
- 11 Huang H, Zhang Z, Cheng P, *et al.* Opportunistic spectrum access in cognitive radio system employing cooperative spectrum sensing. Proceedings of VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference, Barcelona, Spain, 2009: 1~5
- 12 Jo O, Choi H H, Cho D H. Seamless spectrum handover

improving cell outage in cognitive radio systems. Proceedings of 2009 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Hannover, Germany, 2009:1~6

[作者简介]



朱星宇,男,武汉大学硕士研究生,主要研究方向为认知无线网络频谱分配与网络优化。



周怀北,男,武汉大学教授、博士研究生导师,主要研究方向为无线通信工程与生物信息工程。



黄俊园,男,武汉大学博士研究生,主要研究方向为认知无线电和基于 WLAN 的室内定位。

(收稿日期:2013-03-19)

(上接第 50 页)

- 5 孙晶,尚星星,赵会群等.基于 TTCN-3 底层协议测试方法研究.计算机应用研究,2010,27(11):4165~4181
- 6 詹宝容,庾锡昌.基于 TTCN-3 的移动业务测试平台的设计.计算机工程与设计,2011,32(6):1893~1897
- 7 段修文,张德民,李小文. LTE 系统确认模式的设计与一致性测试.计算机应用研究,2011,28(12):4708~4710

[作者简介]



董宏成,男,重庆邮电大学重庆市移动通信技术重点实验室硕士生导师,主要研究方向为下一代网络。



张宁,女,重庆邮电大学重庆市移动通信技术重点实验室硕士研究生,主要研究方向为 TD-LTE 系统 TTCN 扩展测试集仪表开发。



李小文,男,重庆邮电大学重庆市移动通信技术重点实验室研究员,长期从事 TD-SCDMA 移动通信系统开发,目前主要从事 TD-LTE 系统开发工作。

(收稿日期:2012-12-30)