·移动互联与通信技术· 文章编号:1000-3428(2018)06-0045-05 文献标志码:A 中图分类号:TN92

基于改进帧结构的认知网络吞吐量优化方法

吴建伟,李艳玲,臧翰林

(火箭军工程大学 信息与通信工程系,西安 710025)

摘 要: 在认知无线电网络中,频谱感知的效能往往通过系统的吞吐量进行体现。为此,在传统感知帧结构的基础上,通过引入协作频谱预测和频谱分割定义一种新的感知帧结构,并结合基于 DBSCAN 的隐马尔科夫模型协作频谱预测算法,提高频谱预测的准确率,降低协作预测带宽的消耗,从而增加系统吞吐量。仿真结果表明,与不含协作模块的频谱分割帧结构和含有协作模块但未进行频谱分割的帧结构相比,改进的帧结构可有效提高系统吞吐量。

关键词: 协作频谱预测;频谱分割;频谱感知;隐马尔科夫模型;系统吞吐量

中文引用格式: 吴建伟,李艳玲,臧翰林. 基于改进帧结构的认知网络吞吐量优化方法[J]. 计算机工程,2018,44(6):45-49.

英文引用格式: WU Jianwei, LI Yanling, ZANG Hanlin. Cognitive network throughput optimization method based on improved frame structure[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6):45-49.

Cognitive Network Throughput Optimization Method Based on Improved Frame Structure

WU Jianwei, LI Yanling, ZANG Hanlin

(Department of Information and Communication Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

【Abstract】 In cognitive radio network, spectrum sensing performance tends to be reflected by the system throughput. Based on the traditional perceptual frame structure, this paper redefines a new perceptual frame structure by introducing the cooperative spectrum prediction and spectrum segmentation. By combining the Hidden Markov Model (HMM) cooperative spectrum prediction algorithm based on DBSCAN, the accuracy of spectrum prediction is improved, the consumption of cooperative prediction bandwidth is reduced, and the effect of improving system throughput is achieved. Simulation results show that the system throughput under the improved frame structure is improved compared with that of the frame structure without the cooperation module and the frame structure with the cooperation module but without spectrum segmentation.

【Key words】 cooperative spectrum prediction; spectrum segmentation; spectrum sensing; Hidden Markov Model (HMM); system throughput

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046881

0 概述

随着无线通信技术的发展,频谱需求越来越大,认知无线电技术作为解决频谱资源短缺的一种新型技术被广泛应用。但研究者在实际应用中发现,由于信号传输的路径损耗和阴影效应导致感知存在严重的不确定性,因此增加了主次用户的碰撞率,致使认知系统的吞吐量急剧下降。

由此,研究者们提出了多种方法来解决这个问题,主要表现在 2 个方面:从频谱感知技术层面出发的方法和通过引入频谱预测机制的方法。文献[1]利用检查协作频谱感知技术,降低了单个 SU 感知的不确定性,同时通过减少 SU 上报处理中心的感知的信息,降低了时延,进而提高了感知的准确性。文献[2-3]通过对频谱感知时隙的优化,在一个通信时隙中以最小的感知时隙完成对频谱的感知,通过这种减少感知时间的方法来达到增加传输时间的目的,实现了系统吞吐量的提升。文献[4-5]针对频谱随机感知能量消耗大和时延长的问题,提出了感知时间和门限联合分配的方法和基于感知门限的频谱预测感知机制,根据频谱预测的空闲概率值对空闲信道进行排序,然后按概率从大到小的顺序进行感

作者简介:吴建伟(1991—),男,硕士研究生,主研方向为认知无线电网络、频谱预测;李艳玲,副教授、博士后;臧翰林,硕士研究生。

收稿日期:2017-04-19 修回日期:2017-05-25 E-mail:15319876672@163.com

知。该方法有效地降低了时延和能耗,进而实现了系统频谱利用率和吞吐量的跃升。文献[6-7]在中继场景下,通过贝叶斯决策融合方法对频谱感知时间和吞吐量优化来得到最佳的中继选择结构,以此获得系统最大的吞吐量。文献[8-10]在传统的感知帧结构中分别加入预测模块和协作模块,使传统的盲目感知变成有方向的感知,以此提高了系统的吞吐量,同时研究了系统通信强度、预测错误率和信道数量 3 个因素对吞吐量的影响。文献[11]对传统的感知帧结构进行分割,使该结构中一个子频带可以进行连续感知,另一个则进行数据传输,通过对子频带带宽的优化获得最大的吞吐量。文献[12]在文献[11]的基础上引入预测模块,通过新的帧结构使感知效率得到进一步的提高,进而提高了系统的吞吐量。

文献[1-7]均以感知门限和感知时间为优化对象来提高感知效率,进而提高系统的吞吐量,但都未对 SU 的帧结构进行分析。文献[8-12]从 2 个方向对帧结构进行改进,提高了系统的吞吐量。但笔者通过分析发现,其中方法均考虑了预测模块和协作预测模块,但未考虑频谱分割能够使 SU 连续感知,致使吞吐量有所下降。文献[11-12]分割帧结构并引入预测模块,但未考虑协作模块对预测准确率的影响,影响了系统吞吐量的提高。针对以上问题,本文通过引入协作模块和频谱分割,重新设计 SU 帧结构,以此提升认知无线电网络(Cognitive Radio Network,CRN)系统的吞吐量。

1 传统 CRN 感知模型

1.1 能量感知结构框架

传统的频谱感知是指在认知无线电网络中,次级用户对授权频谱进行感知,判断主用户在某时刻是否占用授权频谱的过程。通常将次级用户感知到的主用户信号的模型假设为二元模型[13-14],其过程表示为:

$$x(t)=\begin{cases}hs(t)+n(t),\mathrm{H}_1\\ n(t),\mathrm{H}_0\end{cases} \tag{1}$$

其中,$t=1,2,\cdots,N$,表示第 t 个采样点,$N=2\tau_s W_s$,τ_s 和 W_s 分别表示频谱感知的时间和带宽,$x(t)$ 代表接收信号的形式,h 代表接收信号的信道增益,$s(t)$ 代表主用户发射的信号,$n(t)$ 代表接收信道上的高斯白噪声,H_1 代表授权信道处于占用状态,H_0 代表授权信道处于空闲状态。

根据能量检测法算法性能可知,SU 接收机的平均统计检验量如式(2)所示。

$$R=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}|x(t)|^2 \tag{2}$$

通过 R 与判决门限阈值 λ 的比较,可以得到最终的观测值 O:

$$O=\begin{cases}0,R<\lambda\\ 1,R\geqslant\lambda\end{cases} \tag{3}$$

其中,0 表示 PU 不存在,1 表示 PU 存在。

此处假设 $n(t)$ 服从均值为 0、方差为 σ^2 的独立同分布的高斯白噪声,信道的噪声功率谱密度和 PU 的功率谱密度分别为 N_0 和 N_P,根据文献[11]可知检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为:

$$P_d=P(R\geqslant\lambda\,|\,\mathrm{H}_1)=Q\left(\frac{\lambda}{(1+\gamma_P)\sqrt{2\tau_s W_s}}-\sqrt{2\tau_s W_s}\right) \tag{4}$$

$$P_f=P(R<\lambda\,|\,\mathrm{H}_0)=Q\left(\frac{\lambda}{2\tau_s W_s}-\sqrt{2\tau_s W_s}\right) \tag{5}$$

其中,Generalized Marcum 函数 $Q(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty}\mathrm{e}^{\frac{-t^2}{2}}\mathrm{d}t$,$\gamma_P$ 为 PU 在 SU 处的信噪比,若信道带宽为 W,则 $\gamma_P=|h|^2\frac{N_P W}{N_0 W}$。

1.2 传统帧结构下的系统吞吐量分析

传统 CRN 系统中的信道帧结构如图 1 所示。

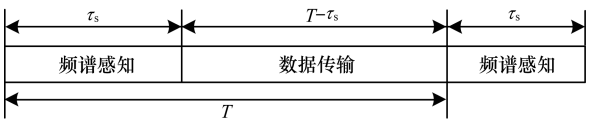


图 1 传统 CRN 感知帧结构

定义系统一个感知时隙 T 内的吞吐量为 C,一个感知时隙即为信道的一个帧,SU 在一帧中的吞吐量有 3 种情况:当感知状态为占用时,SU 处于等待期,则 SU 的吞吐量为 0;当感知状态为空闲时,信道的真实状态可能为空闲,也可能为占用,因此存在 2 种吞吐量的情况,分别如式(6)和式(7)所示。

$$C_0=\frac{T-\tau_s}{T}W\mathrm{lb}(1+\gamma_S)P(\mathrm{H}_0)(1-P_f) \tag{6}$$

$$C_1=\frac{T-\tau_s}{T}W\mathrm{lb}\left(1+\frac{\gamma_S}{1+\gamma_P}\right)P(\mathrm{H}_1)(1-P_d) \tag{7}$$

其中,γ_S 为 SU 信号在 SU 接收机处的信噪比,$P(\mathrm{H}_1)$ 和 $P(\mathrm{H}_0)$ 分别为 PU 存在和不存在的概率。

2 基于协作频谱预测的频谱感知模型

2.1 改进感知帧结构

本文在文献[12]的基础上加入了用户协作模块,重新定义了感知帧的结构,如图 2 所示。该结构在频域上,将一个时隙的带宽 W 分割成两部分:W_b 的带宽用于频谱预测、用户协作和频谱感知;$W-W_b$ 的带宽用于数据传输。在时域上,2 个子频带的时间均为时隙长度 T。这种分频工作的方式使得感知过

程可以连续进行,即如果在本帧中感知结果为空闲,则下一帧中在该子频带上传输数据,同时下一帧中感知过程继续,反之,则处于等待状态。

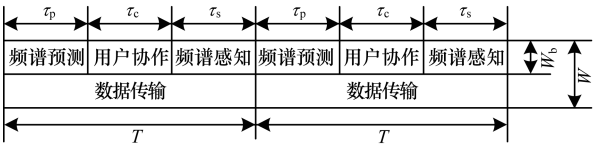


图 2　本文模型感知帧结构

该帧结构的优势在于克服了传统周期感知间断工作的弊端,即每次感知时,处于数据传输的子频带可以继续传输数据,而不需要受感知工作影响而中断,只有当下一帧感知状态为占用时,才中断数据传输,这样就可以使得在信道感知状态不发生变化的基础上,SU 数据传输不间断进行,有效地解决了由于感知中断而导致的系统吞吐量损耗的问题,提高了传输的效率。同时,采用频谱分割的方法,一个时隙 T 内的数据传输时间也为 T,有效地增加了数据传输的时间。另外,在帧结构中加入用户协作模块,提高了频谱预测的准确率,进而提高了系统的吞吐量。同时,为了在频域上更高效地利用有限的带宽 W_b,并且在时域上减少固定时隙 T 中用户协作所耗费的时间 τ_c,在用户协作模块中采用基于DBSCAN的隐马尔科夫模型(Hidden Markov Model,HMM)协作频谱预测算法,通过对 SU 的聚类,减少向协作中心上传的数据量[11],进而减少带宽消耗和协作时间,以提高系统的吞吐量。

由图 2 可知,经过频谱分割后的帧结构,单位时隙 T 内的数据传输速率为[12]:

$$\gamma_0 = T(W - W_b)\mathrm{lb}(1+\gamma_s) \tag{8}$$

$$\gamma_1 = T(W - W_b)\mathrm{lb}\left(1+\frac{\gamma_S}{1+\gamma_P}\right) \tag{9}$$

其中,γ_0 表示信道中 PU 不存在的数据传输速率,γ_1 表示信道中 PU 存在的数据传输速率。

2.2　次用户吞吐量分析

本文假定 CRN 系统有 N 个 PU、M 个 SU,即有 N 个授权信道、M 个 SU 收发机。由于频谱感知前要先进行协作频谱预测,因此协作预测的准确率直接影响整个系统的性能,这里假设协作预测的准确率为 P_{pd}。在基于 DBSCAN 的隐马尔科夫协作频谱预测模型中,信道预测为空闲和占用的概率分别为:

$$P_p^0 = P(H_0)P_{pd} + P(H_1)(1-P_{pd}) \tag{10}$$

$$P_p^1 = P(H_1)P_{pd} + P(H_0)(1-P_{pd}) \tag{11}$$

由于信道感知结果也存在空闲和占用 2 种状态,因此预测状态、感知状态和真实状态三者之间存在如图 3 所示的二叉树关系。

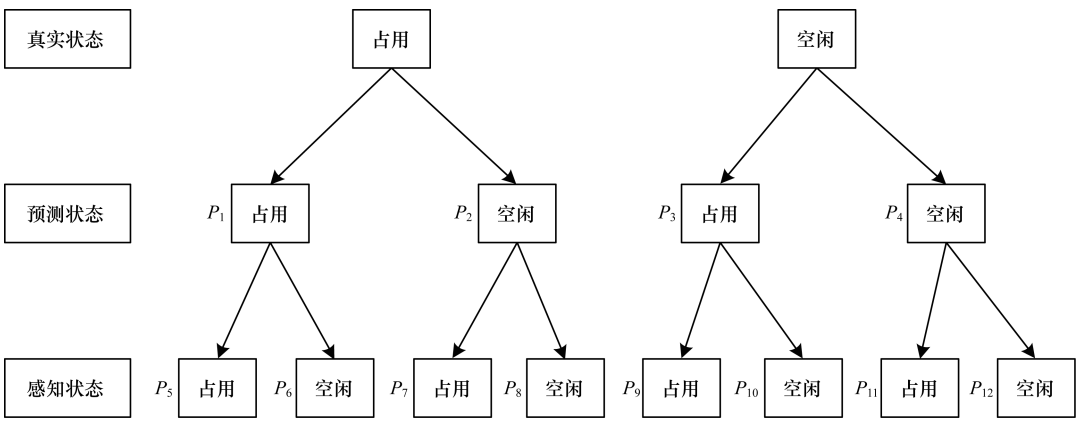


图 3　真实状态到感知状态之间的二叉树关系

由图 3 可知,当预测状态为空闲时,从空闲的信道中选择一条进行感知;当预测状态为占用时,系统从 N 条信道中随机选择一条进行感知。因此,共有 8 种感知情况,但只有感知空闲时才会进行数据传输,即 P_1 到 P_6、P_2 到 P_8、P_3 到 P_{10} 和 P_4 到 P_{12} 这 4 种情况。由文献[10]可知在 N 个信道中存在空闲信道和全占用的概率分别为:

$$P_N^0 = \sum_{K=1}^{N} C_N^K (P_P^0)^K (P_P^1)^{N-K} \tag{12}$$

$$P_N^1 = \sum_{K=1}^{N} C_N^0 (P_P^0)^0 (P_P^1)^N = (P_P^1)^N \tag{13}$$

因此,系统的吞吐量如式(14)所示。

$$C = (P_6 + P_8)\gamma_1 + (P_{10} + P_{12})\gamma_0 \tag{14}$$

其中:

$$P_6 = \frac{P(H_1)P_{pd}(1-P_d)}{P_p^1}P_N^1$$

$$P_8 = \frac{P(H_1)(1-P_{pd})(1-P_d)}{P_p^0}P_N^0$$

$$P_{10} = \frac{P(H_0)(1-P_{pd})(1-P_f)}{P_p^1}$$

$$P_N^1 P_{12} = \frac{P(H_0)P_{pd}(1-P_f)}{P_p^0}P_N^0$$

由于 p_d 和 p_f 由接收机的系统参数决定,此处认为 p_d 和 p_f 为常量,因此由式(14)可知系统吞吐量与预测准确率 P_{pd}、通信强度 ρ、信道数量 N 和数据传输带宽($W-W_b$)4 个参数有关。由于本文采用协作预测的模型,因此预测准确率 P_{pd}受协作预测方法的影响,同时协作用户的数量还直接影响数据传输带宽($W-W_b$)的大小和感知的准确率,由此可以看出协作方法的选取对系统吞吐量有很大的影响。

同时,在本文感知帧结构的基础上选用基于 DBSCAN 的隐马尔科夫些协作频谱预测算法,具有以下特点:

1)该方法通过采用 SU 协作的方法,可以有效提高预测的准确率 p_{pd},由文献[8]和文献[10]可知,随着准确率的增加,系统的吞吐量也随之增加,即加入协作模块可以有效提高系统的吞吐量。

2)本文所选的预测方法,在 SU 协作过程中采用基于 DBSCAN 算法对多个预测 SU 进行聚类,利用聚类后的族进行族间的协作预测,该方法能有效地降低参加协作预测的 SU 数量,但同时又不会影响预测的精度。由于信道在传输过程中存在传输错误的概率,因此减少向协作中心上传的用户数,可以进一步降低因传输错误率增加而引起的预测精度下降的问题,并且减少上传的的用户数,也意味着降低上传的数据量,这样就可以有效降低处理带宽的需求 W_b,提高传输数据的带宽($W-W_b$),进而提高系统的吞吐量。

3 实验与结果分析

3.1 仿真环境

在仿真环境中,假设授权信道 N 为 30,SU 数量 M 为 15,通信强度 ρ 是指授权信道占用的概率,即 $\rho=P(H_1)$,其他仿真参数参考文献[10-12,15],具体数值如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
检测概率 p_d	0.9
误警概率 p_f	0.1
时隙长度 T/ms	100
信道带宽 W/MHz	6
单个 SU 预测带宽 W_P/MHz	0.15
频谱感知带宽 W_S/MHz	0.6
频谱预测时间 τ_p/ms	5
SU 信号在 SU 接收机处的信噪比 γ_S/dB	20
PU 信号在 SU 接收机处的信噪比 γ_P/dB	-15

3.2 吞吐量分析

由于 SU 的吞吐量受预测准确性、信道数量、通信强度和数据传输带宽的影响,因此在一个时隙下 SU 的理论最大吞吐量为 C_{max},表达式为:

$$C_{max}=P(H_0)\gamma_0+P(H_1)\gamma_1 \tag{15}$$

令 $P(H_0)=0.8$,$P(H_1)=0.2$,$W_b=W_{b,min}=W_s=0.6$ MHz,则吞吐量的归一化表达式为:

$$C_{norm}=\frac{C}{C_{max}} \tag{16}$$

3.2.1 预测准确率和通信强度分析

图 4 给出了系统归一化后的吞吐量和通信强度以及预测准确率之间的关系,这里假设信道子频带的带宽 $W_b=W_s=0.6$ MHz。可以看出系统吞吐量随着通信强度的增加逐渐降低,当通信强度达到 0.7 后,吞吐量下降的趋势明显增强,这是因为此时授权信道大部分处于占用状态,频谱“空穴”减少所致。但笔者发现在通信强度为 1 时,系统的吞吐量并没有减小到 0,而是在接近 0 的一个小范围内,这是因为尽管此时所有授权信道的真实状态都处于占用状态,但由于预测错误率和感知错误率的存在,导致系统错误地认为仍然有可用的信道可以传输数据,进而在干扰主用户的情况下进行了数据传输,导致其吞吐量不为 0。同时,笔者发现预测准确率越高,在通信强度为 1 时,其吞吐量越小,反之则越大,这是因为预测准确率越高其预测错误率越低,而在通信强度为 1 时,主要是预测错误率影响系统吞吐量。从图 4 中还可以得出在通信强度一定的情况下,预测准确率越高则吞吐量越大,预测准确率越低则随着通信强度的增加,吞吐量下降的程度越大,由此两点可以看出预测准确率对系统吞吐量的影响较大。

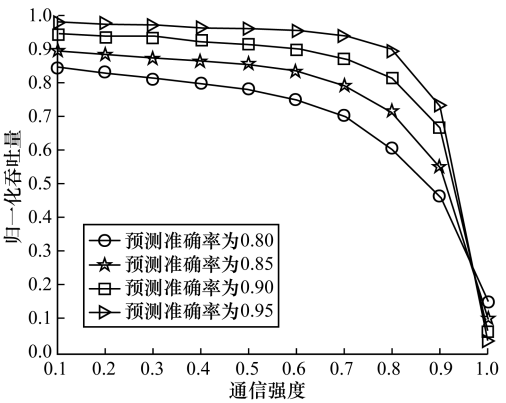


图 4 吞吐量与通信强度和预测准确率之间的关系

3.2.2 协作用户数分析

由于信道子频带的带宽 W_b 必须满足 W_s、W_P、W_c 中的最大值,而 $W_c=MW_p$,子频带的带宽 $W_{b,min}=W_s=0.6$ MHz,因此看出协作用户数量 M 决定 W_b 的大小,也就影响着系统的吞吐量。这里的预测准

确率是指单个 SU 的预测率。

由图 5 可知,系统的归一化吞吐量与协作 SU 数量之间存在如凸函数性质的关系,当协作数 $M=4$ 时,系统获得最大吞吐量;当 $M<4$ 时,系统吞吐量随着协作数的增加而增加,是因为协作提高了系统的预测准确率,进而提高了吞吐量,在这个过程中 W_b 始终为 0.6 MHz;当 $M>4$ 时,$W_b=W_c=MW_p$,因此,子频带带宽 W_b 随协作数 M 的增加呈线性增长,进而导致传输数据的带宽($W-W_b$)线性下降,而此时系统的预测准确率增幅很小,几乎保持不变,故系统的吞吐量主要取决于传输带宽,由此系统的吞吐量表现出和传输数据带宽($W-W_b$)相同的线性下降趋势。

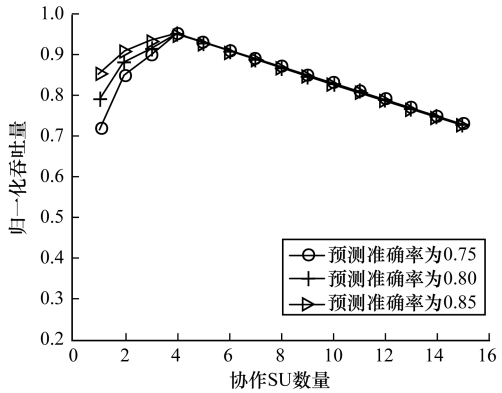


图 5　吞吐量与协作 SU 数量的关系

3.2.3　3 种帧结构的性能分析

图 6 分析比较了本文帧结构、文献[12]中不含协作模块的频谱分割帧结构以及文献[10]中含有协作模块但未进行频谱分割的帧结构下的吞吐量。对比发现,在通信强度一致的情况下,本文帧结构下的吞吐量优于其他 2 种帧结构,并且在本文帧结构的方案下,系统吞吐量一直维持在一个较高的水平。由此证明,在本文新定义的帧结构的基础上结合基于 DBSCAN 的隐马尔科夫协作频谱预测算法,可以有效提高系统的吞吐量,改善认知无线电网络中频谱感知的效能。

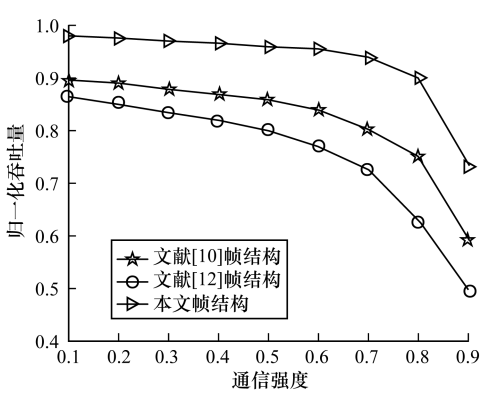


图 6　3 种帧结构下的吞吐量对比

4　结束语

本文分析传统的感知帧结构以及现有改进的帧结构,提出一种新的感知帧结构。通过对影响系统吞吐量的通信强度、预测准确率和协作用户数 3 个参数的仿真对比,验证了在该帧结构下,系统的吞吐量能够得到有效的提高。协作预测方法的预测时延问题是影响系统吞吐量的关键,如何在确保协作预测精度的同时,最大限度地降低预测时延,将是下一步的研究方向。

参考文献

[1] 郭　晨,彭　涛,王　玮,等. 认知无线电网络的检查协作频谱感知技术[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(S1):334-342.

[2] 尹斯星,李书芳. 认知无线电中预测性频谱探测时间的优化[J]. 北京邮电大学学报,2010,33(5):112-116.

[3] 张　晓,王金龙,吴启辉,等. 认知无线电中基于状态转移概率的感知时隙优化算法[J]. 通信学报,2011,32(8):72-80.

[4] 兰昆伟,赵杭生,李湘洋,等. 认知无线电中基于感知门限的频谱预测研究[J]. 通信技术,2015,48(2):165-170.

[5] 刘　鑫,张建伟,杨　昊,等. 多信道认知无线电频谱感知时间和门限联合分配[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(5):117-121.

[6] 张　茜. 基于频谱预测的协作频谱感知[D]. 西安:第二炮兵工程大学,2015.

[7] CHATTERJEE S, MAITY S P, ACHARYA T. Energy efficient cognitive radio system for joint spectrum sensing and data transmission[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuit and Systems, 2014,4(3):292-300.

[8] 杨　健,赵杭生. 不完美频谱预测对认知无线网络吞吐率的提升[J]. 军事通信技术,2015,36(1):112-116.

[9] HOU F, CHEN X, HUANG H, et al. Throughput performance improvement in cognitive radio networks based on spectrum prediction[C]//Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press,2016:655-658.

[10] 张　阳,赵杭生,杨　健,等. 基于协作频谱预测的认知网络吞吐率分析[J]. 计算机工程与应用,2016,52(24):153-157.

[11] YIN W, REN P, DU Q, et al. Delay and throughput oriented continuous spectrum sensing schemes in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2012,11(6):2148-2159.

[12] 李　红,齐丽娜. 基于频谱预测和频谱分割的吞吐量优化[J]. 南京邮电大学学报,2016,36(2):60-64.

[13] 邢晓双. 认知无线电网络中的频谱预测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[14] 李明源,李　鸥,孙武剑. 基于噪声不确定性的双门限协作频谱感知算法[J]. 计算机工程,2014,40(4):81-86.

[15] ERYIGIT S, BAYHAN S, TUGCU T. Energefficient multichannel cooperative sensing scheduling with heterogeneous channel conditions for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(6): 2690-2699.

编辑　金胡考