doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.02.014

基于协作频谱预测和频谱分割的认知无线电网络吞吐量优化

方浩军,齐丽娜

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:随着无线通信技术的迅猛发展,频谱资源变得日益紧张。认知无线电技术(Cognitive Radios, CR)旨在充分利用授权无线电频谱资源。而当前的 CR 技术在认知无线电网络吞吐量上存在一定程度的限制,原因是传统的频谱感知技术随机选择信道进行感知操作,从而导致次用户(Secondary User,SU)在认知无线电网络中的吞吐量较低。文中为了优化系统吞吐量,结合协作频谱预测和频谱分割技术重新设计次用户的感知帧结构。具体实现上先将次用户的频谱划分为两个子频带,其中一个子频带加入协作频谱预测功能,旨在提高次用户选择空闲信道进行感知的概率。由于引入了分频工作思想,整个帧时隙全部可以用于数据传输,从而进一步提高了系统的吞吐量。文中讨论了在协作频谱预测条件下,分别在主用户(Primary User,PU)通信强度和预测精度不同时的系统吞吐量,并与传统感知帧结构下的系统吞吐量进行了对比,仿真结果表明,与传统感知帧结构相比,文中所提出的方案在系统吞吐量性能上有较大提升。

关键词:认知无线电网络;协作频谱预测;吞吐量优化;频谱分割

中图分类号:TN925 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2020)02-0089-06

Throughput improvement in CRN Based on cooperative spectrum prediction and spectrum division

FANG Haojun, QI Lina

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the rapid development of wireless communication technology, spectrum resources are increasingly scarce. The cognitive radio (CR) aims to make full use of the authorized radio spectrum resources. However, current CR techniques have a throughput limitation issue. The reason is that traditional spectrum sensing technology for randomly selecting channel on sensing leads to the secondary user's low throughput in the cognitive radio network (CRN). To optimize the system throughput, the secondary users ' frame structure is redesigned based on cooperative spectrum prediction and spectrum division. Firstly, the band of the channel is divided into two sub-bands. Then, the spectrum prediction slot is added into the sub-band to improve the probability for selecting idle channels by secondary users on sensing. By introducing the idea of the frequency division, the whole frame slot can be used for data transmission, further improving the system throughput. The system throughput with different communication intensities and prediction accuracies under the condition of the cooperative spectrum prediction is compared with the system throughput on the traditional frame structure. Simulation results show that the proposed scheme has a grea-

收稿日期:2019-07-01;**修回日期**:2019-09-18 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(61427801)资助项目

作者简介:方浩军,男,硕士研究生;齐丽娜(通信作者),女,博士,副教授,qiln@njupt.edu.cn

引用本文:方浩军,齐丽娜. 基于协作频谱预测和频谱分割的认知无线电网络吞吐量优化[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(2):89-94.

ter improvement in the system throughput.

Keywords: cognitive radio network (CRN); cooperative spectrum prediction; throughput performance optimization; spectrum division

认知无线电技术是提高频谱资源利用率的主要解决方案之一,已成为近年来的热点研究问题。过去十年中,认知无线电技术作为无线通信中频谱稀缺问题的有效解决方案受到了广泛关注,其允许次用户(Secondary User,SU)在不影响主用户(Primary User,PU)通信的前提下接入主用户信道并进行数据传输。频谱感知作为认知无线电技术中的必要步骤,确保次用户感知主用户授权信道并及时检测频谱的占用状态。当授权信道未被主用户占用时,次用户便接入信道并进行数据传输,反之,次用户等待或选择另一个信道进行感知[1-2]。在认知无线电网络(Cognitive Radio Network,CRN)中,次用户随机选择信道进行感知操作时,信道感知结果为占用状态概率较高,从而导致系统吞吐量较低[3-4]。这个问题已被广泛研究,文献[5]提出了一种利用无线电环境地图作为辅助系统的阈值自适应协作频谱感知方法,通过高可靠性的协作感知方法作出全局的决策,提高了网络吞吐量并降低了漏检概率。文献[6]提出了一种执行频谱感知和调度的跨层框架,用以实现主用户和次用户吞吐量之间的最佳平衡。

在现有的研究工作中,很少有研究尝试提高次用户的吞吐量,而如何提高选择空闲信道进行感知的概率成为提高次用户吞吐量的关键。频谱预测技术基于历史数据预测未来的信道状态。文献[7]讨论了认知无线电网络中关于使用频谱预测技术的研究现状。基于频谱预测,次用户可以选择空闲概率较高的信道进行感知。因此,次用户正确感知信道为空闲的概率能得到显著的提高,从而提高次用户吞吐量。为解决次用户在认知无线电网络中的低吞吐量问题,本文重新设计次用户的帧结构,在感知阶段之前增加协作频谱预测阶段,并推导出次用户吞吐量的近似表达式。通过融合次用户预测结果提高预测精度。文献[8]提出了基于隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model,HMM)的频谱预测方法,由于在大型认知无线电网络中,信道的真实状态对次用户是不可见的,即隐藏状态,次用户通过感知获得的信道状态为观察状态。次用户可以通过历史感知结果数据对信道状态进行预测,并选择预测结果为空闲的信道进行感知。文献[9]提出了一种基于 BP 神经网络(Back Propagation Neural Network)的预测算法,使用二进制序列训练预测器,基于主用户的历史数据预测下一个时隙内主用户的活动状态,重复训练直至达到均方误差最小值,训练完成,便可投入使用。文献[10]提出了一种基于移动平均算法(Moving Averaging Algorithm,MAA)的能量预测方法,其中的频谱预测机制基于时间频谱状态序列,但 MAA 只适用于频谱状态变化微小且短时间的预测。文献[11]中的研究结果表明,多用户的协作感知性能优于单用户。对于频谱预测,多用户协作也同样可以提高预测准确率,因此,使用协作频谱预测技术的优势显而易见。但对于多用户协作频谱预测的研究相对较少。文献[12]将协作策略用于存在多个次用户和多个主用户的认知无线网络环境,通过协作频谱预测技术避免次用户之间的自干扰,证明了预测准确度与协作用户数量存在优化关系。

综合以上研究成果,本文考虑基于协作预测技术和分频工作思想,重新设计次用户的帧结构。仿真结果表明,与传统帧结构相比,本文提出的方案有更优的认知无线电系统吞吐量。

1 系统模型和分析

1.1 CR 中的信号模型

传统感知模型指的是在认知无线电网络中,次用户对授权信道频谱进行感知操作,从而得到主用户在当前时隙的活动状态。一般情况下,将次用户进行感知操作得到的主用户信号假设为一个二元模型[13]

$$x(t)=\begin{cases}h*s(t)+n(t), & H_1\\ n(t), & H_0\end{cases} \tag{1}$$

其中,$t=1,2,\cdots,N$ 代表第 t 个采样时间点,$N=2T_sW$,T_s 和 W 分别代表感知时间以及感知带宽,$x(t)$为接收信号,h 为信道增益,本文假设 h 是常数,$s(t)$为 PU 的发射信号,$n(t)$为接收信道的高斯白噪声,H_1 表示感知信道此时处于被占用状态,H_0 表示感知信道此时处于空闲状态。

1.2 传统帧结构及吞吐量分析

传统的认知无线电网络中,次用户的感知帧结

构如图 1 所示[1-2]。假设次用户的一个感知时隙长度为 T,吞吐量定义为 C。次用户在一个帧时隙内的感知结果有 3 种情况:感知结果为占用状态,则次用户暂时处于等待期,吞吐量 $C=0$;感知为空闲状态,对应有两种可能,感知正确,即信道状态为空闲,感知错误,即信道真实状态为占用状态,这两种情况对应的吞吐量分别为

$$C_0=\frac{T-T_s}{T}W\log_2(1+SNR_s)P(H_0)(1-P_f) \quad (2)$$

$$C_1=\frac{T-T_s}{T}W\log_2\left(1+\frac{SNR_s}{1+SNR_p}\right)P(H_1)(1-P_d) \quad (3)$$

其中,C_0 表示感知结果为空闲,且信道真实状态也为空闲时的吞吐量;C_1 表示感知结果为空闲,但信道真实状态为占用时的吞吐量。SNR_s 代表次用户接收机处收到次用户信号时的信噪比,SNR_p 代表次用户接收机处收到主用户信号时的信噪比。P_d 代表检测概率(即真实状态为占用,感知结果为占用的概率),P_f 代表虚警概率(即真实状态为空闲,感知结果为占用的概率)。

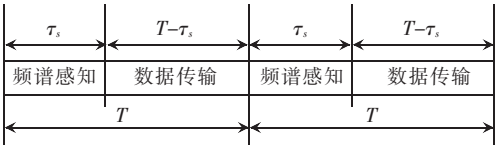


图 1　传统的感知帧结构

2　基于协作频谱预测的频谱感知模型

2.1　协作预测方法下的感知帧结构

本节主要分析如何对传统的感知帧结构进行优化处理,目的是在一定条件下尽可能最大化系统吞吐量。文献[13]提出一种改进的帧结构,如图 2 所示,即在频谱感知之前加上协作频谱预测阶段,采用基于遗传算法优化的神经网络预测模型。信道预测结果分为预测为空闲和预测为占用,相对应的概率为 P_p^0(空闲)和 P_p^1(占用)

$$P_p^0=P(H_0)P_{pd}+P(H_1)(1-P_{pd}) \quad (4)$$

$$P_p^1=P(H_0)(1-P_{pd})+P(H_1)P_{pd} \quad (5)$$

其中,P_{pd}代表预测准确度。

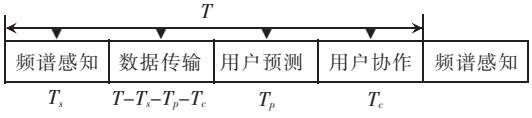


图 2　加入协作频谱预测后的感知帧结构[13]

信道的真实状态和预测状态之间的概率分布如表 1 所示。

表 1　预测状态分布及相应概率

信道真实状态	预测状态	概率
空闲	空闲	$P(H_0)P_{pd}$
空闲	占用	$P(H_0)(1-P_{pd})$
占用	空闲	$P(H_1)(1-P_{pd})$
占用	占用	$P(H_1)P_{pd}$

2.2　加入频谱分割后改进的感知帧结构

本文的主要思路是对传统帧结构进行改进,引入分频工作思想,结合协作频谱预测和频谱分割技术,进一步改进次用户的感知帧结构,并参考文献[14]中的协作频谱预测方法。如图 3 所示,首先选择将帧时隙的带宽在频域上分为两个部分,W_b 频带用于进行协作频谱预测和频谱感知,$W-W_b$ 频带用于传输数据。两个子频段在时域上的时间均为时隙长度 T。这种设计的优势在于解决了传统帧结构感知有间断的问题,即感知过程可以连续进行,具体表现为,如果在当前帧时隙内的感知状态为空闲,则下一帧在该子频带传输数据,并且下一帧内继续感知。否则,次用户进入等待状态。

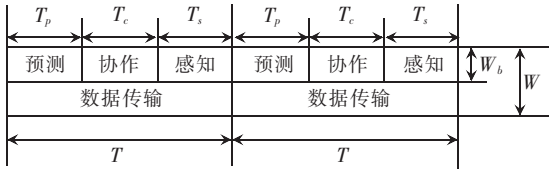


图 3　协作频谱预测改进图

如图 3 所示,改进后的帧结构不仅解决了感知中断问题,而且在时域上,两个子频带时间均为时隙长度 T,即在一个时隙 T 内用于传输数据的时间也为 T,这极大地增加了数据传输时间。而传统的帧结构,总会有一些时间上的损耗,或用于感知工作,或用于预测工作,但是如图 3 所示的帧结构将整个时隙 T 都用于传输数据,从而有效地提升了系统吞吐量。

基于图 3 的帧结构,式(2)和式(3)得到相应改进,如式(6)和式(7)所示

$$C_0=T(W-W_b)\log(1+SNR_s) \quad (6)$$

$$C_1=T(W-W_b)\log\left(1+\frac{SNR_s}{1+SNR_p}\right) \quad (7)$$

2.3　系统吞吐量分析

本文的系统模型参考文献[15]设定。假定在认知无线电网络中主用户信道数量为 N,次用户数量为 M,每个主用户活动独立,不受其他用户影响。设定当信道状态是占用时为 1,当信道状态是空闲时为 0。次用户机会性地访问授信信道。主用户的

到达时间间隔服从参数为 λ 的泊松分布,主用户的用频持续时间服从参数为μ 的二项分布。假设信道被随机地分配,当所有信道都被占用时的概率为 P_{n1},而在 N 个信道中存在空闲信道的概率为 P_{n0}。P_{n0}和 P_{n1}分别如式(8)和式(9)所示

$$P_{n0} = \sum_{k=1}^{n} C_N^k (P_p^0)^k (P_p^1)^{N-k} \tag{8}$$

$$P_{n1} = C_N^0 (P_p^0)^0 (P_p^1)^{N-0} = (P_p^1)^N \tag{9}$$

其中,N 为授信信道数,k 为 N 个授信信道中存在的空闲信道数。

当经过协作预测阶段后存在空闲信道时,从空闲信道中选择一条进行感知操作。而当协作预测状态为占用的时候,随机选择一条信道进行感知操作,这是由于预测存在错误概率,即有可能将空闲状态的信道预测为占用状态。在协作阶段,对多个次用户的预测结果进行进一步地处理。在小范围内的次用户之间进行协作,将其中一个次用户作为协作组 leader,剩余的次用户作为 follower,follower 用户的预测数据集中传给 leader 用户,然后根据“少数服从多数”原则,进一步地融合预测数据。单个帧长内次用户的协作时间开销定义为 T_c

$$T_c = \frac{kNT}{C_0} \tag{10}$$

其中,k 代表参与协作的次用户数量,N 为授信信道数量,T 代表帧长,C_0 由式(6)给出。

依照重新设计的帧结构,每一帧中次用户用于传输信息的持续时间为帧长 T,而频谱感知持续时间参考文献[16]为 T_s,如式(11)所示

$$T_{s\min} = \frac{1}{SNR_p * f_s}(Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d)\sqrt{2 * SNR_p + 1}) \tag{11}$$

其中,SNR_p 为主用户信号在次用户收发机处的信噪比,f_s 为采样频率,P_d 和 P_f 分别为检测概率和虚警概率。本文中 P_d,P_f 给定,因此 T_s 可视为常量。

另外,信道的感知结果可能出现感知错误的情况。从真实状态到预测结果,再到感知结果的关系路线图,如图 4 所示。

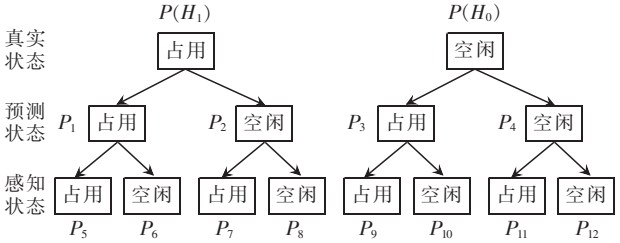


图 4 真实状态、预测状态和感知状态关系图

如图 4 所示,只有当感知结果为空闲时,次用户才会尝试接入信道,因此只需要关注概率为 P_6,P_8,P_{10}和 P_{12}这 4 种情况,分别代表了预测结果为 1、感知结果为 0、真实状态为 1,预测结果为 0、感知结果为 0、真实状态为 1,预测结果为 1、感知结果为 0、真实状态为 0,预测结果为 0、感知结果为 0、真实状态为 0。P_6,P_8,P_{10}和 P_{12}分别为

$$P_6 = \frac{P(H_1)P_{pd}(1-P_d)}{P_p^1}P_{n1} \tag{12}$$

$$P_8 = \frac{P(H_1)(1-P_{pd})(1-P_d)}{P_p^0}P_{n0} \tag{13}$$

$$P_{10} = \frac{P(H_0)(1-P_{pd})(1-P_f)}{P_p^1}P_{n1} \tag{14}$$

$$P_{12} = \frac{P(H_0)P_{pd}(1-P_f)}{P_p^0}P_{n0} \tag{15}$$

其中,$P(H_1)$和 $P(H_0)$分别代表信道状态为占用时的概率和信道状态为空闲时的概率。$P(H_1)$通常被看作主用户的通信强度,P_{pd}则代表预测的准确度,P_{n0}和 P_{n1}由式(8)和式(9)给出,P_{p1}和 P_{p0}由式(4)和式(5)给出,P_d 和 P_f 分别为检测概率和虚警概率。

推导得出平均吞吐量的表达式为

$$C = (P_6 + P_8)C_1 + (P_{10} + P_{12})C_0 \tag{16}$$

由于 P_d 和 P_f 的值由接收机决定,因此在本文中被视为常数,进而可以推断出吞吐量 C 主要由预测的准确度,授信信道 N 的数量,通信强度 $P(H_1)$以及带宽决定。本文沿用文献[14]中提出的神经网络预测模型进行协作预测,因此预测准确度 P_{pd}受协作预测模型的影响。而文献[14]已经证明了神经网络的预测方法能有效地提高预测准确度,进而提升吞吐量性能。本文选择在协作预测基础之上结合频谱分割技术,在协作预测中采用分组-聚簇融合的方式,减少单次上传预测结果的次用户的数量,进而降低了用于进行感知、协作和预测的带宽 W_b,提升了用于传输数据的带宽,从而进一步提升系统吞吐量。

3 仿真结果分析

3.1 仿真参数设置

IEEE 802.22[16]基于认知无线电,是第一个全球无线电标准,在一定的无线区域网络内分配无线电资源而不会对主用户产生干扰,因此本文仿真参

数全部依照 IEEE 802.22 的无线网络标准设定。参考文献[13],单个次用户用于频谱预测的时间设置为 5 ms。具体参数设置如表 2 所示。

表 2　仿真参数表

参数	数值
检测概率 P_d	0.9
虚警概率 P_f	0.1
帧时隙长 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
频谱预测时长 T_p/ms	5
SU 接收到其他 SU 信号信噪比 SNR_s/dB	20
SU 接收到主用户信号信噪比 SNR_p/dB	−15

仿真中设定授信信道数 N 为 30,次用户数量 M 为 15。仿真中仅考虑信道为确定信道,因此 SNR_s 设置为 20 dB。

3.2　归一化吞吐量

给定一个时隙内的最大吞吐量公式为

$$C_{\max} = P(H_0)C_0 + P(H_1)C_1 \tag{17}$$

归一化吞吐量公式为

$$C_{\text{norm}} = \frac{C}{C_{\max}} \tag{18}$$

由于仿真中需要比较传统帧结构和改进后的帧结构在吞吐量性能方面的差异,因此需要给出传统帧结构吞吐量公式,如式(19)所示

$$C_{\text{nopre}} = P(H_1)(1-P_d)C_1 + P(H_0)(1-P_f)C_0 \tag{19}$$

推导出原始的归一化吞吐量公式,如式(20)所示

$$C_{\text{norm_nopre}} = \frac{C_{\text{nopre}}}{C_{\max}} \tag{20}$$

3.3　性能分析

本文首先比较了改进后帧结构在不同的 P_{pd}(预测准确度)下,吞吐量的性能差异,设定 W_b 为相同值,即 $W_b = W_s = 0.6$ MHz。当 P_{pd} 的值分别为 0.95,0.90,0.85 和 0.80 时,改进后帧结构的归一化吞吐量变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出,通信强度相同时,当预测准确度下降,吞吐量随之下降,而预测准确度相同时,随着主用户通信强度的增加,吞吐量下降。当 $P(H_1)$ 为 0.7 时,吞吐量性能开始急剧下降。当 $P(H_1)$ 达到峰值(即全占用的情况)时,吞吐量却没有到达 0,原因是预测和感知存在一定误差,因此尽管真实状态下信道全占用,但是依旧会有次用户预测结果显示信道状态为空闲,从而导致最终结果只会逐渐逼近 0。由此可见预测准确度对吞吐量性能的影响。

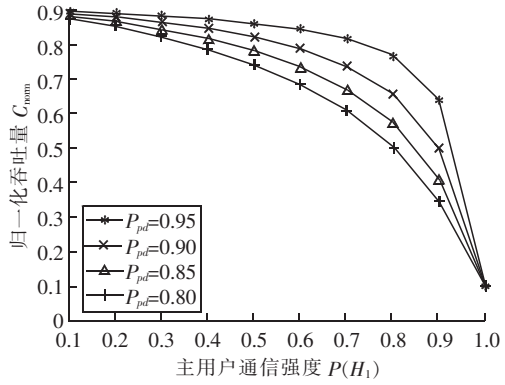


图 5　不同预测准确度对吞吐量的影响比较

同时,仿真还比较了传统帧结构和改进后帧结构在吞吐量性能上的差异,这里设定 $P_{pd} = 0.95$,$W_b = W_s = 0.6$ MHz。如图 6 所示,在通信强度的递增过程中,传统帧结构下的归一化吞吐量递减趋势较为明显,且与改进后帧结构的归一化吞吐量之间的差值逐渐增大。可以看出在主用户通信强度相同时,改进后帧结构在吞吐量性能上总是优于传统帧结构。

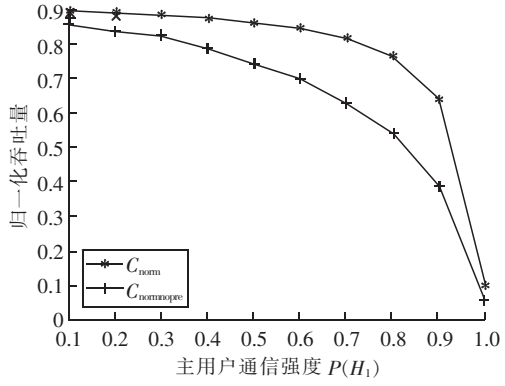


图 6　传统帧结构和改进后帧结构吞吐量性能比较

4　结束语

本文通过在传统的感知帧结构上进行改进,加入协作频谱预测阶段,并引入分频工作思想,增加了数据传输的时间,从而提高系统吞吐量。通过仿真,在不同预测准确度和不同主用户通信强度下对提出的方案进行了验证,以及将改进后帧结构与传统帧结构在吞吐量性能方面进行了比较。仿真结果表明,本文采用改进后的帧结构方案,可以在很大程度上提升系统吞吐量。然而,在仿真中可以看出,预测精度对系统吞吐量影响很大,频谱的预测方法有待进一步改进,后续将进行深入研究。

参考文献:

[1] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116 – 130.

[2] SUN S L, CHEN N, RAN T T, et al. A stackelberg game spectrum sharing scheme in cognitive radio-based heterogeneous wireless sensor networks[J]. Signal Processing, 2016, 126: 18 – 26.

[3] LI B, ZHAO C L, SUN M W, et al. Spectrum sensing for cognitive radios in time-variant flat-fading channels: A joint estimation approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(8): 2665 – 2680.

[4] LI B, SUN M W, LI X F, et al. Energy detection based spectrum sensing for cognitive radios over time-frequency doubly selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2): 402 – 417.

[5] SEOL D Y, LIM H J, IM G H. Cooperative spectrum sensing with dynamic threshold adaptation[C]// IEEE Global Telecommunications Conference. 2009: 1 – 6.

[6] MICHELUSI N, MITRA U. Controlled spectrum sensing and scheduling under resource constraints[C]// International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). 2015: 1 – 6.

[7] XING X S, JING T, CHENG W, et al. Spectrum prediction in cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 90 – 96.

[8] CHEN Z, GUO N, HU Z, et al. Channel state prediction in cognitive radio, Part II: single-user prediction[C]// Proceedings of IEEE Southeastcon. 2011: 50 – 54.

[9] TUMULURU V K, WANG P, NIYATO D. Channel status prediction for cognitive radio networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2012, 12(10): 862 – 874.

[10] LIN Z J, JIANG X Y, HUANG L F, et al. A energy prediction based spectrum sensing approach for cognitive radio networks[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2009: 1 – 4.

[11] LI Z, YU F R, HUANG M. A cooperative spectrum sensing consensus scheme in cognitive radios[C]// The 28th Conference on Computer Communications. 2009: 2546 – 2550.

[12] 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.
XING Xiaoshuang. Research on spectrum prediction in cognitive radio networks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[13] 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.
ZHANG Yang, ZHAO Hangsheng, YANG Jian, et al. Throughput performance of CRN based on cooperative spectrum prediction[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(24): 153 – 157. (in Chinese)

[14] ZHANG Y ZHAO H S. The throughput analysis based on multi-SUs cooperative spectrum prediction for cognitive radio networks[C]// IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). 2016: 2318 – 2322.

[15] HOU F K, CHEN X, HUANG H, et al. Throughput performance improvement in cognitive radio networks based on spectrum prediction[C]// International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). 2016: 655 – 658.

[16] IEEE. IEEE 802. 22 standard[S/OL]. http://www.ieee802.org/22/, 2016.