基于BP神经网络的协作频谱感知技术

陈 易 张 杭 胡 航
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要 认知无线电技术可以利用主用户未使用的频谱资源来有效地提高频谱利用率。单用户感知技术虽然简单但可靠性较低,协作频谱感知技术可以显著地提高频谱感知的性能。现有的大部分协作感知都是在假设各认知用户的信噪比相同的前提下进行研究。然而在实际环境中,由于每个认知用户所处的环境不同,其信噪比不同,对融合中心判决的影响也不同。如何在提升检测性能的同时提升系统的能量效率是关键问题。提出一种基于BP(Back Propagation)神经网络的协作频谱感知技术,它利用频谱环境的历史信息,通过BP神经网络提高频谱感知性能。仿真结果表明,该算法可以在保证协作感知性能的同时减少参与协作的认知用户数,从而减少能量消耗。

关键词 认知无线电,BP神经网络,频谱感知,能量效率
中图法分类号 TN911 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.009

Cooperative Spectrum Sensing Technology Based on BP Neural Network

CHEN Yi ZHANG Hang HU Hang
(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract The technology of cognitive radio can use the untapped spectrum resource to increase the cognitive radio technology efficiency dramatically. Although the spectrum sensing for only one technique is simple, it is not reliable. However, using the cooperative spectrum sensing can improve the capability of spectrum sensing. Recently, most of the studying about the cooperative spectrum sensing is based on one simple condition that is assuming the signal to noise ratio for each cognitive user is similar. In reality, each cognitive radio user will have different environment, which will produce different signal to noise ratio and different influence on the justification of the fusion center. In addition, another important issue is how to improve the performance of CR system while enhancing the energy efficiency. This paper proposed a method of cooperative spectrum sensing based on BP (Back Propagation) neural network which will improve spectrum sensing performance by using the historical information about the spectrum through BP neural network. The simulation identifies the algorithm can reduce the involved cognitive users and the energy consumption, and guarantee the performance of the cooperative sensing at the same time.

Keywords Cognitive radio, BP neural network, Spectrum sensing, Energy efficiency

1 引言

随着无线通信业务的发展,人们对于频谱资源的需求也越来越多,使得现有的频谱资源变得越发紧张。认知无线电作为一种可以提高频谱利用率的技术被广泛应用于无线通信中[1,2]。认知无线电可以感知周围的网络环境,通过分析从周围环境中获取的相关参数,实时地调整网络参数以适应外部环境的变化。因此,认知无线电可以允许非授权的认知用户在不干扰授权的主用户正常通信的前提下,高效地利用空闲的频谱资源,从而显著提高频谱利用效率。而频谱感知技术是认知无线电的关键技术之一。

目前,频谱感知技术主要分为两类:单用户感知和协作频谱感知。单用户感知主要有3种感知方法,即能量检测、匹配滤波器检测和循环平稳检测。其中,能量检测具有实现简单并且无需系统额外信息的优点而被广泛的使用。然而,在实际的无线信道中,单用户感知由于存在衰落导致的信号不稳定和由于路径损耗导致的隐藏终端[3]等问题,可靠性较低。协作频谱感知利用用户间的相互协作,可以有效地降低衰落及损耗的影响,提高检测的准确性。现有的协作频谱感知技术大多数都是在假定各认知用户独立同分布且具有相同的信噪比的前提下进行研究。然而在实际环境中,由于各认知用户所处的位置与环境的不同,其信噪比也各不相同,每个认知用户的局部判决结果对全局判决的影响度也不相同。文献[10,11]在此基础上提出了信噪比加权的协作频谱感知算法,在一定程度上提高了检测的准确性。在当今资源紧张的世界中,绿色通信[4]越来越多地受到人们的关注。对于传统的电池供能的认知终端,如何能够在提升检测性能的同时提高认知系统的能量效率,也是急待解决的问题。BP神经网络是基

到稿日期:2014-03-09 返修日期:2014-05-19
陈 易(1989—),男,硕士生,主要研究方向为认知无线电,E-mail:yicheng0707@hotmail.com;**张 杭**(1962—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为认知无线电、盲信号处理、通信抗干扰等;**胡 航**(1988—),男,博士生,主要研究方向为认知无线电。

于 BP 算法的多层前馈网络，其网络结构简单，具有自主学习以及适应的能力，应用较为广泛。文献[12]提出了基于人工神经网络的认知无线电频谱感知，虽然提高了检测的准确性但没有考虑能量消耗问题。在此基础上本文提出了一种基于 BP 神经网络的协作频谱感知技术，在不同信噪比条件的前提下，在保证检测准确性的同时降低了能量的消耗。

2 系统模型

假设一个认知无线电网络中有 N 个认知用户和一个融合中心(FC，Fusion Center)。每个认知用户独立地进行感知，感知后将本地判决结果发给融合中心，融合中心将所有的有用的判决融合，最终判决主用户的存在与否。频谱感知实际上是一个二进制假设检验问题：

$$\begin{cases} H_0: y(n)=w(n) \\ H_1: y(n)=h(n)s(n)+w(n) \end{cases} \tag{1}$$

其中，$y(n)$ 为认知用户接收到的信号，$s(n)$ 为主用户信号，$w(n)$ 为加性高斯白噪声(AWGN)，$h(n)$ 为信道增益，H_0 表示主用户空闲，H_1 表示主用户占用信道。

单用户频谱感知主要采用能量检测、匹配滤波检测和循环平稳检测等方法。其中能量检测由于实现容易，复杂度较低，成为最常见的频谱检测方法；又由于其不需要主用户信号的先验知识，与其他方法相比，它更具有普遍性，适用范围更广。目前对于能量检测方法已经十分成熟，本文采用最基础的能量检测进行研究。

能量检测[5]是将实际接收到的信号通过带通滤波器(band-pass filter，BPF)得到滤除带外干扰后的信号，这样就只考虑主用户频段中的能量，不需要考虑带外信号。通过平方求和得到能量值，计算能量检测的检测量，将此检测量与设定好的门限进行比较，最终判决主用户信号存在与否。能量检测的检测量 Y 为：

$$Y=\sum_{n=0}^{N}|y(n)|^2 \tag{2}$$

其中，N 为信号采样点的个数。

假设 λ 是能量检测算法的判决门限，则能量检测方法的检测概率 P_d 及虚警概率 P_f 为：

$$P_d=\Pr(Y>\lambda|H_1) \tag{3}$$

$$P_f=\Pr(Y>\lambda|H_0) \tag{4}$$

假设噪声服从均值为 0，方差为 σ_w^2 的高斯(Gaussian)分布，即 $w(n)\sim N(0,\sigma_w^2)$，则 Y 符合自由度为 2μ 的 χ^2 分布，即[6]

$$Y\sim\begin{cases} \chi_{2\mu}^2, & H_0 \\ \chi_{2\mu}^2(2\gamma), & H_1 \end{cases} \tag{5}$$

其中，$\mu=TW$ 为时间带宽乘积。T 为观测时间间隔，W 为单边带宽，γ 为信噪比。

结合上式，在 AWGN 信道下检测概率 P_d 与虚警概率 P_f 为[6]：

$$P_d=Q_\mu(\sqrt{2\gamma},\sqrt{\lambda}) \tag{6}$$

$$P_f=\frac{\Gamma(\mu,\lambda/2)}{\Gamma(\mu)} \tag{7}$$

其中，$Q_u(.,.)$ 是 Marcum Q 函数，$\Gamma(.,.)$ 是不完全 gamma 函数，$\Gamma(u)$ 是 gamma 函数。

单用户频谱感知虽然实现简单，但可靠性较低。协作频谱感知[7]是一种多用户联合感知检测主用户的方法，其优点是可以解决频谱感知中由噪声的不确定性、衰落、阴影效应引起的问题；相对于单用户频谱感知而言降低了漏检概率和虚警概率，并且协作可以解决隐藏终端问题，减少检测时间。协作频谱感知主要由两种方式实现，即集中式和分布式。集中式协作频谱感知是各个认知用户将各自的本地判决信息发送给融合中心，最终由融合中心进行判决授权用户是否占用频谱。分布式频谱感知是认知用户各自判断哪段频段授权用户空闲，然后与其他用户共享信息，并不需要融合中心，减少了损耗以及工作量。然而分布式协作感知实现相对复杂，本文采用集中式协作频谱感知进行研究。图 1 为集中式协作频谱感知的场景模型。

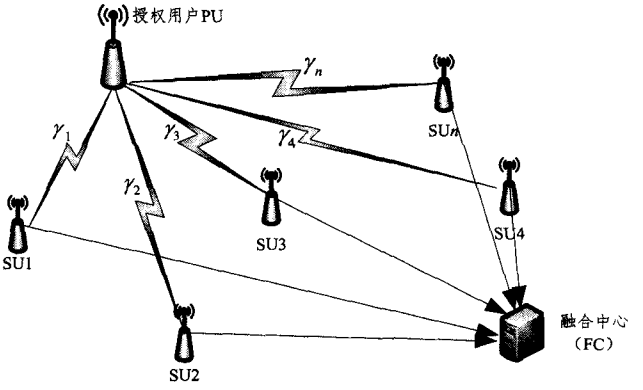

图 1 集中式协作频谱感知场景模型

协作频谱感知硬判决融合算法主要有 3 种："OR"准则、"AND"准则和多数准则。由于"OR"准则的性能要优于"AND"准则和多数准则[8]，目前协作频谱感知在融合中心多数采取"OR"准则进行判决。假设所有的认知用户是独立同分布的，检测概率 Q_d 和虚警概率 Q_f 为[9]：

$$Q_d=1-\prod_{i=1}^{N}(1-P_{d,i}) \tag{8}$$

$$Q_f=1-\prod_{i=1}^{N}(1-P_{f,i}) \tag{9}$$

其中，N 表示参与协作的认知用户总数，$P_{d,i}$ 和 $P_{f,i}$ 分别表示第 i 个用户的检测概率与虚警概率。

3 基于信噪比加权的协作频谱感知

在以往的协作频谱感知算法中，各认知用户都是假定为独立同分布的，并且信噪比是相同的。然而在实际环境中，由于阴影衰落、路径损耗等影响，每个认知用户具有的信噪比不同，因此基于信噪比加权的协作频谱感知被提出。

在信噪比加权的协作频谱感知中，其中的一个认知用户可以接收到其他认知用户的信噪比信息，再分别根据每一个认知用户的信噪比计算权重[10]：

$$\omega_i=\frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^{N}\gamma_i} \tag{10}$$

其中，γ_i 为第 i 个用户的信噪比，$\sum_{i=1}^{N}\gamma_i$ 为 N 个用户的总信噪比，ω_i 为第 i 个用户的权重。每个认知用户的虚警概率 $P_{f,i}$ 和检测概率 $P_{d,i}$ 为[10]

$$P_{d,i}=Q_u(\sqrt{2\gamma_i},\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_i}}) \tag{11}$$

$$P_{f,i}=\frac{\Gamma(\mu,\frac{\lambda}{2\omega_i})}{\Gamma(\mu)} \tag{12}$$

从上式中可以看出，对不同用户能量分配不同的权重，实际上就是重新分配给各个用户不同的动态判决门限，使具有较小信噪比的用户的能量判决门限较高，从而使其对总判决的影响减小。

4 基于 BP 神经网络的协作频谱感知

人工神经网络（简称神经网络）具有复杂模式和进行联想、推理记忆的功能。1986 年，Romelhart 和 Meclelland 提出了误差反向传播算法（Error Back Propagation Algorithm，简称 BP 算法），由于多层前馈网络的训练经常采用误差反向传播算法，人们也常把多层前馈网络称为 BP 网络。由于具有结构简单、工作状态稳定、易于硬件实现等优点，在众多的神经网络模型中，BP 网络的应用最为广泛，尤其是模式识别及分类、系统仿真、图像处理、函数拟合、最优预测等方面[13]。

BP 算法的基本思想是：学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成。如图 2 所示，BP 神经网络由含有 M 个神经元的输入层，含有 I 个神经元的隐含层以及含有 P 个神经元的输出层组成。其中 $\omega_{m,i}$、$\omega_{i,p}$ 分别为输入神经元与隐含层神经元、隐含层神经元与输出神经元之间的连接权值。

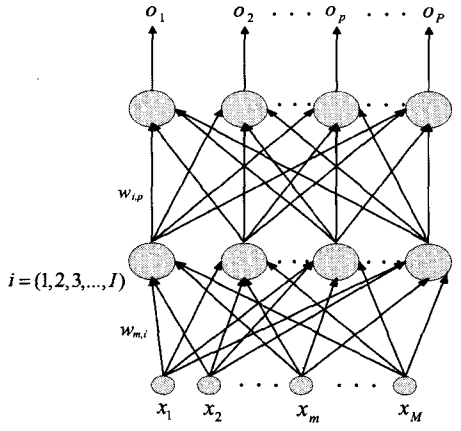

图 2 BP 神经网络的工作流程

由图 2 可得隐含层的输出、输入为：

$$y_m=f(net_m),m=1,2,\cdots,M \tag{13}$$

$$net_m=\sum_{m=0}^{M}w_{m,i}x_m,m=1,2,\cdots,M \tag{14}$$

其中，x_m 为输入层第 m 个节点的输出，$f(\cdot)$为激励函数，

输出层的输出、输入为：

$$o_p=f(net_p),p=1,2,\cdots,P \tag{15}$$

$$net_p=\sum_{i=0}^{P}\omega_{i,p}x_i,p=1,2,\cdots,P \tag{16}$$

BP 神经网络的工作流程为：

(1)工作信号的正向传播。信号前向传递时，网络的权值是固定不变的，权值和其上一层神经元的状态决定该神经元的状态。如果输出层的状态与预测值之间的误差不在预先规定的范围内，则这个误差便成为误差信号反向传播，前面所有层的权值都会改变。

(2)误差信号的反向传播。在误差信号的传播过程中，它所经过的所有层的权值都会进行调节。通过不断地修正权值，最终达到一个最优的状态，使得网络的实际输出更接近期望输出。

上文中所提到的基于信噪比加权的协作频谱感知技术虽然加入了权值设置，使得感知性能得到了一定提升，但其权值的设置无法保证是最优的。本文将 BP 神经网络应用于协作频谱感知，利用 BP 神经网络的自主学习能力，通过训练序列，不断调整权值，优化权值设置，进而达到提升感知性能的目的。本文将前 n 次感知的结果作为训练序列，BP 神经网络各层之间的权值 $\omega_{m,i}$、$\omega_{i,p}$ 联合代表信噪比加权中的权值 ω_i，使得具有不同信噪比的认知用户在融合中心判决时的权值达到最优，进而使得整体的检测性能得到提高。并且通过 BP 神经网络可以将权值调整为最优，即可以在保证同等检测性能的情况下减少参与协作的认知用户数，减少系统的能量消耗。

5 计算仿真与性能分析

本文在无衰落的 AWGN 环境下，假定场景中只存在一个授权用户，多个认知用户对该授权用户进行协作感知，并且所有用户的位置保持不变。基于以上场景对传统的协作频谱感知、基于信噪比加权的协作频谱感知和本文提出的基于 BP 神经网络的协作频谱感知的性能进行对比。取参数 $u=5$，$N=10$。10 个认知用户的信噪比分别为(10 8 5 2 1 −1 −3 −5 −7 −10 dB)，由式(10)可得在信噪比加权的协作频谱感知中每个认知用户的权重为：$\omega_1=0.4128$，$\omega_2=0.2604$，$\omega_3=0.1305$，$\omega_4=0.0654$，$\omega_5=0.0520$，$\omega_6=0.0328$，$\omega_7=0.0207$，$\omega_8=0.0131$，$\omega_9=0.0082$，$\omega_{10}=0.0041$，在传统的协作频谱感知中每个认知用户的权重为 $\omega_i=1$。判决准则统一采用“OR”准则。本文对门限 λ 采用 100 个采样点进行仿真，结果如图 3 所示。

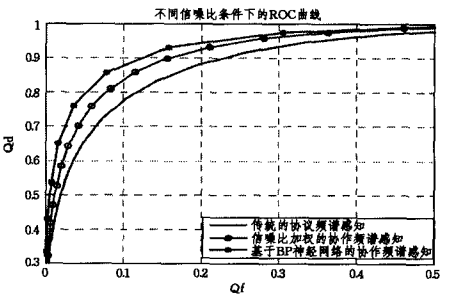

图 3 3 种协作频谱感知性能对比($N=10$)

由图 3 可以看出，本文提出的基于 BP 神经网络的协作频谱感知，由于引入了 BP 神经网络，优化了权值设置，在相同虚警概率的前提下，其检测概率均要优于以往传统的以及基于信噪比加权的协作频谱感知。由此，本文提出的协作感知方法可以使得权值达到最优化，提高了检测的准确度，提升了感知性能。

在验证提升感知性能的基础上，考虑本文提出的基于 BP 神经网络的协作频谱感知的能效。在信噪比加权的协作频谱感知中仍保持参与协作的认知用户数不变为 $N=10$，而减少基于 BP 神经网络的协作频谱感知中参与协作的认知用户数，用户数分别为 $N=8$ 和 $N=7$。对比基于信噪比加权的协作频谱感知与本文提出的协作频谱感知的检测性能，结果如图 4 所示。

（下转第 64 页）

[20] Carmi S, Havlin S, Kirkpatrick, et al. A Model of Internet Topoloty Using K-shell Decomposition[J]. Proc. natl. acad. sci, 2007, 104(27): 11150-11154

[21] Kleinberg J. Authoritative sources in a hyperlinked environment [J]. Journal of the ACM, 1999, 46(5): 604-632

[22] Page L, Brin S, Motwani R, et al. The Pagerank Citation Ranking: bringing Order to the Web[R]. Stanford Digital Library Technologies Project, 1998

[23] Wouter D N, Andrej M, Vladimir B. Exploratory Social Network Analysis with Pajek[M]. New York: Cambridge University Press, 2005: 196-197

[24] Burt R S. Structural Holes-the Social Structure of Competition [M]. Cambridge Ma: Harvard University Press, 1992: 54-55

[25] 陈勇,胡爱群,胡啸. 通信网中节点重要性的评价方法[J]. 通信学报,2004,25(8):129-135

[26] 张翼,刘玉华,许凯华,等. 一种基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机科学,2011,38(6):88-89

[27] 谭跃进,吴俊,邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践,2006,24(11):79-84

[28] 李艳双,曾珍香,张闽,等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报,1999,28(1):94-97

[29] Jackson J E. A User's Guide to Principle Components[M]. New York: Wiley-Inter-Science, 1991

[30] 戴文战. 一种动态多目标决策模型及其应用[J]. 控制与决策,2000,15(2):197-200

[31] 陈雷,王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策,2003,18(4):456-459

[32] Tzeng Gwo-Hshiung, Opricovic S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(2): 445-455

[33] Zhou Tao, Lü Lin-yuan. Roleof Weak Ties in Link Prediction of Complex Networks[C]// Proceeding of the 1st Acm International Workshop on Complex Networks Meet Information & Knowledge Management. China: ACM, 2009: 55-58

[34] 赵毅寰,王祖林,郑晶,等. 利用重要性贡献矩阵确定通信网中最重要节点[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(9):1076-1079

[35] 国际机场理事会(ACI)数据库. 全球机场排名[EB/OL]. 2013-10-25. http://www.airports.org/cda/aci/display/main/aci_content.jsp? zn=aci&cp=1_9_2_

[36] 陈琳,杜友福,王元珍. MRR:基于 MBR 的空间关系模型[J]. 计算机工程与应用,2002,8331(5):76-78

(上接第 45 页)

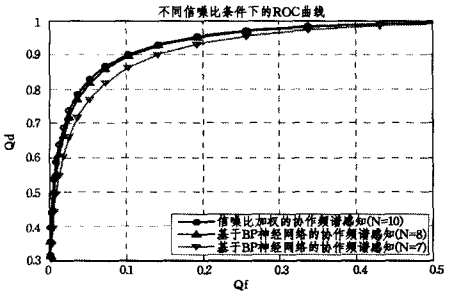

图 4 协作用户数不同时的性能对比(N=10,8,7)

从图 4 中可以看出,本文提出的基于 BP 神经网络的协作频谱感知由于参与协作的认知用户数目的减少,使得系统的检测性能随之下降,但性能仍可以满足系统的要求。在参与协作的用户的个数为 8 时,本文提出的协作感知方法与参与协作的用户的个数为 10 时的基于信噪比加权的协作感知方法的检测性能十分接近,然而由于参与协作的用户数目减少,使得系统的能量消耗降低。由此可见,本文提出的协作感知方法在保证一定的检测准确性的基础上,可以通过减少参与协作的认识用户数目,提高系统的能效。

结束语 在频谱感知中,能否提高系统的检测性能并尽可能地降低能量消耗十分重要。本文提出了一种基于 BP 神经网络的协作频谱感知算法。仿真结果表明,该算法在同等协作用户数的条件下,可以提高系统的检测准确性。并且该算法在保持一定的检测性能的条件下,可以通过减少参与协作的认知用户数目,减少系统的能量消耗,提高系统的能效。但是,采用 BP 神经网络可能会使得系统的感知时间延长,如何协调好感知时间与检测性能的关系需要进一步研究。同时系统所损耗的检测性能与提高的能量效率之间的关系问题也是下一步的研究重点。

参 考 文 献

[1] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18

[2] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220

[3] Zhang Wei, Mallik R K, Letaief K B. Optimization of Cooperative Spectrum Sensing with Energy Detection in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761-5766

[4] Gur G, Alagoz F. Green wireless communication via cognitive dimension: an overview[J]. IEEE Network, 2011, 25(2): 50-56

[5] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals [C]// Proc. IEEE, vol. 55, 1967: 523-531

[6] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). 2003: 3575-3579

[7] Hu Hang, Zhang Hang, Yu Hong. Delay QoS guaranteed cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. International Journal of Electronics and Communications (AEü), 2013, 67: 804-807

[8] Atapattu S, Tellambura C, Jiang H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2011, 10(4): 1232-1241

[9] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments[C]// Proc of IEEE DySPAN. 2005: 131-136

[10] 李玲远,杨爽. 基于信噪比加权的协作频谱感知技术[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2010,44(4):577-579

[11] Huang Xiao-ge, Han Ning, Zheng Guan-bo, et al. Weighted-Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio[C]// Communications and Networking. 2007: 110-114

[12] 刘鹤. 基于人工神经网络的认知无线电频谱感知研究[J]. 电子测试,2012(9):37-41

[13] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004