

最大系统效用合作频谱感知优化算法

秦 臻¹ 薛 峰² 梁继民¹

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071;

2. 湖北省无线电管理委员会, 湖北武汉 430071)

摘 要: 认知系统性能可以通过合作频谱感知技术的应用得到显著提高, 但是由于随着参与频谱感知的认知用户数量增加, 而必然会导致系统资源消耗增大。在综合评估系统性能和系统资源效率效用的基础上, 通过科学选取感知时长和认知用户数量的策略, 提出最大系统效用合作频谱感知优化算法。仿真结果表明, 在系统探测概率确定的条件下, 通过选择恰当的认知用户数量和感知时长, 认知系统效用可以提升到最高。

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 感知开销; 最大系统效用

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)02-0208-06

Cooperative Spectrum Sensing Optimization Algorithm of Maximum System Utility

QIN Zhen¹ XUE Feng² LIANG Ji-min¹

(1. School of Electronics Engineering, Xidian University, Xian, Shaanxi 710071;

2. Hubei Radio Management Committee, Wuhan, Hubei 430071)

Abstract: The technology of cooperation spectrum sensing can improve the system performance through the co-operation detection of multiple users. However, it consumes a lot of system resources with an increase in the number of users involved in sensing. In order to balance the sense performance and efficiency of system resource, taking into account the sense overhead and system efficiency, cooperative spectrum sensing optimization algorithm which has based maximum system utility was proposed. Simulation results show that in the context to meet a given system detection probability, there is a corresponding number of sensing radio and sensing length to maximum cognitive system throughput.

Key words: Cognitive Radio; Spectrum Sensing; Sensing Overhead; Maximum system efficiency

1 引言

在认知无线电系统技术应用中,合作频谱感知技术^[1]是通过多个认知用户共同合作,参与频谱感知,判断相应频谱的使用状况,感知结果的准确性和系统的性能得到了有效提高。

虚警概率和探测概率是频谱感知系统中两个重要的指标参数。对于认知用户,如果虚警概率低,则表示信道的使用效率高。对于首要用户,如果探测概率高,则表明首要用户的信道的保护性强。当在

频谱感知系统中,参与合作频谱感知的认知用户的数量逐渐地增加时,系统产生的错误概率就会逐渐地减小^[2]。这种情况下,参与频谱感知的认知用户数量就会增加,同时感知开销和能量消耗也会随之增大。从系统资源利用率的角度来讲,由于系统资源消耗会随着用户数量增加而增大,所以在认知系统资源利用存在一定限度的情况下,应当适量降低参与合作感知的认知用户数量。但是,从系统性能的角度来讲,如果合作参与频谱感知的认知用户数量越多,感知时间就会更短,数据吞吐量就会更大,

那么探测概率的准确度就会更高。所以,频谱感知技术中的一个重要研究内容,就是如何科学平衡处理好认知系统性能和系统资源利用率之间的关系,实现系统整体性能最高。

文献^[3]在认知用户接收到信号的信噪比不同的情况下,如果系统的虚警概率不变,通过最优认知用户数目选择算法,确保达到最大系统探测概率。文献^[4]在满足系统基本性能要求的情况下,提出最少认知用户需求数量算法。这两种算法实际上是基于 Neyman-Pearson 准则,当虚警概率给定的情况下,如何保证探测概率最高,但只是仅仅论述了系统特定指标参数和感知用户数量变化之间的关系。文献^[5]考虑到系统整体性能和资源利用率之间的相互关系以及如何平衡到一个合理的度,不足之处在于对其他重要指标,如系统吞吐量,未能全面考虑。文献^[6]虽然对感知开销有一定论述,但是对于感知数据传送时所产生的开销,未能涉及到。文献^[7]基于最大化认知系统吞吐量,提出感知用户数量选择算法,然而,合作频谱感知方式却未能够考虑。文献^[8,9]分析了采用了合作频谱感知方式吞吐量和认知用户之间的关系以及最优认知用户数量选择问题。本文从平衡系统性能和系统资源利用率的角度出发,提出基于最大系统效用合作频谱感知优化算法,实现系统整体性能和系统资源效率最大化。

2 系统模型

2.1 IEEE 802.22 系统模型

基于 IEEE 802.22 WRAN 标准^[10]的系统模型如图 1 所示,电视发射台作为首要用户,用户端设备 CPE 作为认知用户,BS 是认知基站。为确保首要用户正常工作,在距离电视发射台 150 公里的区域中,对认知用户进行分布设置,同时设定认知用户均为静态用户。根据 IEEE 802.22 WRAN 标准,认知基站可具体确定认知用户和首要用户之间的距离。在此状况下,认知用户所接收的首要用户发送信号的功率可以表示为: $p_i = \frac{p_{\text{primary}}}{1 + \theta d_i^\alpha}$ 。其中, α 表示为衰减因子, d_i 表示首要用户与第 i 个认知用户之间的距离, θ 为可测常数。由此可知,认知用户所接收到信号的信噪比可以表示为: $\gamma_i = 10 \log \frac{p_i}{\sigma^2}$, $i \in [1, N]$ 。可以假定噪声功率均为相同,同时认知基站可以确定每个单一认知用户的 γ_i , N 表示

为参与频谱感知的认知用户的数量。

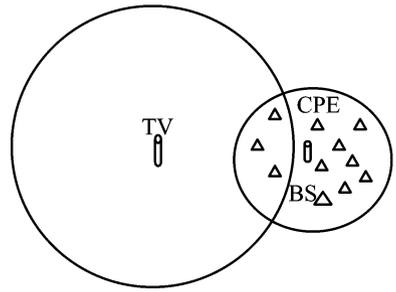


图 1 IEEE 802.22 系统模型

Fig. 1 IEEE 802.22 system model

2.2 合作频谱感知帧结构

合作频谱感知帧结构如图 2 所示。为避免对首要用户的干扰,认知用户必须通过周期性地频谱感知行为,进行空闲信道的探测。具体处理过程是:在感知时长时段内,全体认知用户同时实施频谱感知,所得到的感知结果将在专用控制信道中传输,并且按次序上传至数据融合中心。融合中心根据相关规范和要求,对首要用户是否出现并占用信道做相应地预测和处理。如果信道处于空闲状态,认知用户将对数据进行接收和发送的处理任务,若信道的状态处在应用状态,则认知用户要进行初始化下一次感知工作。

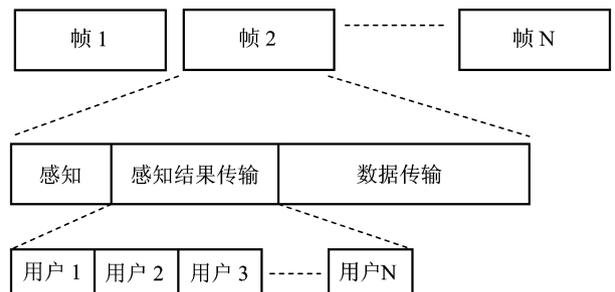


图 2 合作频谱感知帧结构

Fig. 2 frame structure of cooperation spectrum sensing

在传统算法中,通常认为全体认知用户共同参与频谱感知任务,并都传递感知结果至认知基站。而在认知无线电系统中,多是采用时分复用(TDMA)方式将感知结果传递到相应的认知基站,综合处理结果作为硬判决合作检测结果。当首要用户信号被检测到后,认知用户必须马上退出通信,并将当前使用信道立即交付给首要用户使用。当然,由于认知用户数量的不断增加,必然导致延长感知结果传输时长,感知开销就会因此而逐渐变大。

3 基于最大系统效用合作频谱感知优化算法

3.1 最大系统效用合作频谱感知优化算法

合作频谱感知帧结构主要由感知时隙和传输时隙组成。其中,传输时隙主要包括全体认知用户的感知信息传输和数据传输。根据系统检测可知,感知时长越长,则系统探测概率就会增大,虚警概率就会降低。认知用户每帧时长是固定的,若感知时长增加,那么认知用户有效传输时长就会减少,认知系统的吞吐量就会随之减少。因此需要研究感知时长和系统吞吐量两个指标参数之间的相互平衡。另外,在不增加感知时长的情况下,采用合作频谱感知技术,通过增加参与感知的认知用户数量的方式,提高认知系统的传输性能。但是,这也同时增加了系统的感知开销,消耗了系统资源。所以,要实现系统的效用最高,就需要优化平衡相关的指标参数,科学选取感知时长和认知用户数量。因此,提出最大系统效用合作频谱感知算法。系统效用函数可以表示为:

$$\max_{L, \tau} R(L, \tau) = \beta \lambda(L) + (1 - \beta) \left(\frac{T - \tau - LT_R}{T} \right) (1 - p_f) p(H_0)$$

$$s. t. Q_d(L, \tau) \geq P_d \quad (1)$$

主要由包括三个部分:

$$(1) \text{ 系统的有效资源利用率}^{[5]}: \lambda(L) = \frac{N - L}{N}$$

表示认知无线系统中剩余的有效可用资源的利用率,即在 N 个认知用户组成的认知网络中,有 L 个认知用户参与合作频谱感知;

$$(2) \text{ 系统设计参数: } \beta$$

其中, $0 \leq \beta \leq 1$, 表示在系统设计中,对系统性能和复杂性之间的平衡参数。若需要重点考虑系统的复杂性,则按照系统的要求,参数 β 可设置为大于 0 的数值;若需要重点考虑系统性能时,参数 β 可设置为 0;

$$(3) \text{ 系统的归一化吞吐量: } \left(\frac{T - \tau - LT_R}{T} \right) (1 - p_f) p(H_0)$$

其中, T 表示为感知周期时长, τ 表示为感知时长, L 表示为参与感知的认知用户数量, T_R 表示为传送一个认知用户的判决结果所需的时隙长度, $\frac{T - \tau - LT_R}{T}$ 则表示为减去感知开销后,实际传输数据的时长与感知周期时长的比值。这里与文献^[7]的差异是,在此处从合作频谱感知技术要求出发,对传输每个认知用户的感知信息时发生的系统开销均进行了相应的必要处理。

由此可知,若在感知周期时长 T 一定的情况下,如果感知时长 τ 越大,那么有效数据传输时长越小;另外,若参与感知的认知用户数量 L 越多,那么系统的虚警概率就会越低,相反,探测概率则会越高。但是如果参与感知的认知用户数量逐渐增加,那么相应的传递感知信息时长也会越来越长,最后导致感知开销也逐渐增大。所以,如果要确保系统的吞吐量最大化,就必须选取合适的认知用户数量及感知时长。

可以得出,认知系统效能函数主要与以下几个指标参数有关:一是系统的归一化吞吐量,可表示为 $\left(\frac{T - \tau - LT_R}{T} \right) (1 - p_f) p(H_0)$;二是系统的有效资源利用率 $\lambda(L)$,表示认知无线系统剩余的可用资源;三是系统设计参数 β ,它表示系统性能和复杂性之间的平衡参数。

3.2 性能分析

系统分析主要是以系统的性能分析为主,为了便于分析对比,对公式进行了简化。系统设计参数 $\beta = 0$,那么公式(1)就表示认知系统的归一化吞吐量,这就是一个基于约束条件的二个变量的优化问题,下面进行性能分析。

存在性证明:

假设在认知用户数量一定的情况下,分析系统吞吐量和感知时长之间的关系。系统吞吐量对感知时长求偏导数,如果该导数存在一个零值,那么就表示在固定的认知用户数量的情况下,存在有一个对应的感知时长,可以保证使系统吞吐量最大。

证明:对吞吐量求偏导数

$$\frac{\partial R}{\partial \tau} = -\frac{P(H_0)}{T} \left((1 - Q_f) + (T - \tau - LT_R) \frac{\partial Q_f}{\partial \tau} \right)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial Q_f}{\partial \tau} = L(1 - P_f)^{L-1} \frac{\partial P_f}{\partial \tau}$$

由于 $\tau \in [0, T]$, 分别将感知时长区间两边的端点值代入式中,得到:

$$\tau = 0, \frac{\partial P_f}{\partial \tau} \rightarrow -\infty, \frac{\partial Q_f}{\partial \tau} \rightarrow -\infty, \frac{\partial R}{\partial \tau} \rightarrow +\infty$$

$$\tau = T, \frac{\partial R}{\partial \tau} = -\frac{P(H_0)}{T} (1 - Q) < 0$$

由于这是一个连续函数,其端点函数值互异,则该函数一定存在一个值为 0。这也就表示。当 $L \in [1, N]$ 时,在固定的认知用户数量的情况下,总存在有一个对应的感知时长,可以使系统吞吐量达到最大。同理可证,在固定的感知时长的情况下,同样存在有一个相

对应的感知用户数量,保证系统的吞吐量达到最大。

4 性能分析与仿真

仿真实验条件如图 1 所示。基本前提是,认知基站能够确认每个认知用户所在的地理位置,每个认知用户接收到信号的信噪比都是相同的。假设认知用户随机分布在以认知基站为中心,半径 30km 区域范围内。首要用户和认知基站的距离为 150km。认知基站接收到的首要用户信号的信噪比为 -20dB。

当 $\beta=0$ 时情况下,对系统的效能状况进行分析。仿真参数设置如下:信号带宽 6MHz,帧长 $T=20\text{ms}$,探测概率 $P_d=0.9$,此时系统的效用函数等效于系统的归一化吞吐量。

4.1 感知时间和归一化吞吐量的关系

归一化吞吐量与感知时长性能曲线如图 3 所示,表示感知时间和吞吐量的关系。随着感知时长的增大系统的归一化吞吐量先增大至最大值后又逐渐减小。由于随着感知时长的增加,系统的虚警概率减小,所以系统的吞吐量增大,但随着感知时长的增加意味着系统的感知开销也逐渐增大,相应减少了数据传输时长,因此其吞吐量到达最大值后又逐渐减小。

在特殊情况下,当认知用户数量为一个时,即 $L=1$,表示只有一个认知用户,并不存在合作频谱感知任务的情形。由图 3 可知,这种情况下,达到最大吞吐量所需要的感知时间最长。与合作频谱感知方式相比较,只有唯一认知用户状态下的吞吐量远小于合作感知状态下的吞吐量。由仿真可知,在满足系统性能要求的前提下,通过采用多个认知用户进行合作频谱感知的方式,可以在较短的感知时长内达到最大吞吐量。

分析可以得出,由于参与感知认知用户数量 L 增加,那么虚警概率就会降低,信道会占用更多的时间传输感知结果,信道的有效传输时间就会减少。

如图 3 所示,当参与感知用户数量的逐渐增加后,系统的归一化吞吐量也随着增大,但是到达最高值后,又逐渐减小。一方面,参与感知的认知用户的数量增加,系统探测性能就会随之提高,但是检测开销也会随之增大,导致数据传输时间减小,系统的吞吐量必然降低;相反,如果参与感知的认知用户的数量减少,相应的检测开销就会降低,系统的探测性能随之降低,结果很容易产生和首要用户的发生碰撞的情况。由于系统探测性能和吞吐量之间是互为抑制和约束的。所以,只有在首先满足系统所需的探测概率前提下,然后在二者之间采取相对优化平衡的折衷方案,科学优化选取适当参与感知的认知用户数量,确保系统效能最大。

由图 3 可知,每一个最大的归一化吞吐量,都必然

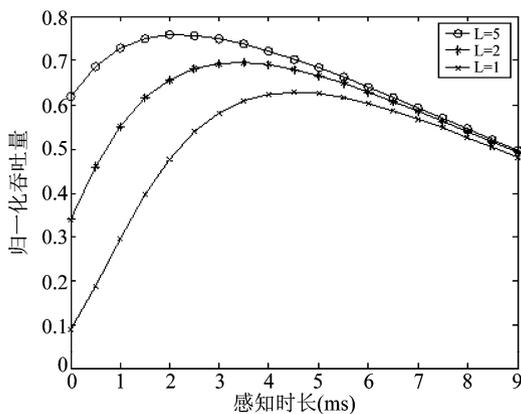


图 3 归一化吞吐量与感知时长性能曲线

Fig. 3 performance of normalized throughput with varying sensing length

对应一个最优感知时长,当参与感知用户数量增加时,最优感知时长随之减小。分析表明,在保证系统探测概率的前提下,通过增加参与频谱感知认知用户数量,系统感知时间可以明显减少。

4.2 参与感知用户数量和归一化吞吐量之间的关系

归一化吞吐量与感知用户数量性能曲线如图 4 所示。当参与感知的认知用户数量保持一定的情况下,系统归一化吞吐量起初随着感知时长的增加而增加,然后又随之减小。分析表明,由于随着感知时长的增加,系统发现空闲频谱能力 $1-Q_f(L)$ 在逐渐增大,系统感知周期保持不变,就会导致系统有效数据传输时间减少。所以,因此当感知用户数量一定时,必然有一个一个最优感知时长对应于最大化的系统归一化吞吐量。

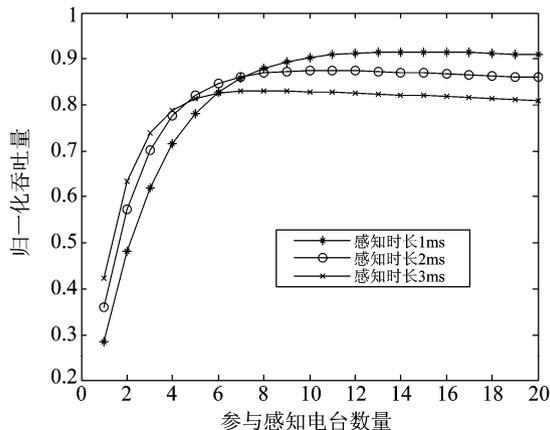


图 4 归一化吞吐量与感知用户数量性能曲线

Fig. 4 performance of normalized throughput with varying number of cognitive users

仿真表明,随着参与感知的认知用户数量的逐渐增加,由于认知用户的共同参与,系统的感知时长会随之减少,系统归一化吞吐量可逐渐达到最大值。当归

一化吞吐量达到峰值后,感知时长如果继续增加,系统发现空闲频谱能力 $1-Q_f(L)$ 仍然维持不变,与此同时,系统的有效数据传输时长会因为感知时长的增加而减小,故系统归一化吞吐量就会逐渐降低。

文献^[6]中所论述的情况,实际上就是当 $L=1$ 时,系统的归一化吞吐量表达式,对此作为特例处理。

当 $\beta>0$ 时的情况下,即分析系统复杂性对系统效用所产生影响:

4.3 系统效用函数与参数 β 之间的关系

下面分析系统效用函数与参数 β 之间的关系。首先假设认知用户的数量为 $N=20$, 参数 β 对应的值分别为 0, 0.1, 0.3。

系统效用函数与参数 β 的性能曲线如图 5 所示,当参与感知认知用户数量逐渐增加时,系统的效用函数值起初是逐渐增大,当达到峰值后,然后又会逐渐地降低。也就是说,随着感知用户数量的增加,系统的有效资源利用率逐渐减小,系统的归一化吞吐量先增大后逐渐减小,二者相互作用,使得系统效用函数出现最大值后逐渐减小的情形。当然,特殊状况时,当 $\beta=0$ 时,认知系统的归一化吞吐量实际上就是系统效用函数。

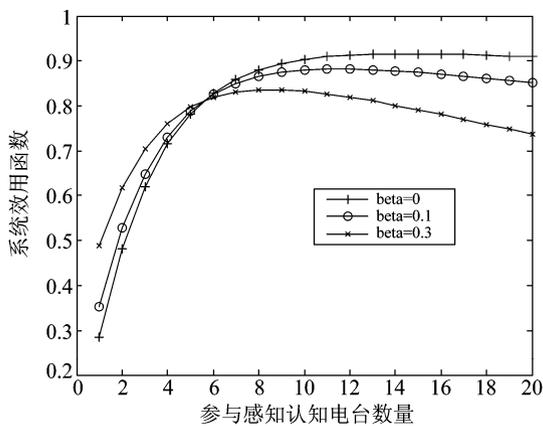


图5 系统效用函数与参数 β 的性能曲线

Fig. 5 performance of system utility function and varying parameter β

仿真同时表明,系统效用函数最大值,随着参数 β 逐渐增大而降低,而参与的感知用户数量在某一区间内对应效用函数的最大值。所以,必须选取适量的用户数目,平衡和兼顾系统的效用和系统的性能之间的关系,才能够实现系统性能最优。

5 小结

多个认知用户共同合作参与频谱感知的合作频谱

感知技术提高可以显著提升系统的性能。然而,随着参与频谱感知的认知用户数量增多必然会使得系统资源的消耗也随之增大。为提高系统的整体效能,提出基于最大系统效用合作频谱感知优化算法,折衷优化系统性能和系统资源效率。仿真表明,在满足给定系统探测概率前提下,选取适宜的认知用户数量和感知时长,认知系统效用能够达到最大。

参考文献

- [1] Mitola J III, Maguire G Q. Cognitive Radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Journal on Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Peh E, Ying-Chang Liang. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks [C] // Proceedings of 2007 IEEE on Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon. 2007: 27-32.
- [3] Wei Zhang, Mallik R K, Ben Letaief K. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive Radio networks [C] // Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing, China. 2008: 3411-3415.
- [4] Ghasemi A, Sousa E S. Asymptotic performance of collaborative spectrum sensing under correlated log-normal shadowing [J]. IEEE Journal on Communications Letters, 2007, 11(1): 34-36.
- [5] Yunfei Chen. Optimum number of secondary users in collaborative spectrum sensing considering resources usage efficiency [J]. IEEE Journal on Communications Letters, 2008, 12(12): 877-879.
- [6] Ying-Chang Liang, Yonghong Zeng, Peh E, et al. Sensing-Throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [7] Srinivasa S, Jafar S. How much spectrum sharing is optimal in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 4010-4018.
- [8] Shuang Li, Zizhan Zheng, Eylem Ekici and Ness Shroff. Maximizing System Throughput by Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks [R]. <http://www.cse.ohio-state.edu/~lish/root.pdf>, 2012.
- [9] 曾昆, 彭启航, 唐友喜. 报告信道传输错误环境下协作感知最优用户数分析. [J]. 信号处理, 2011, 27(3): 444-449. Kun Zeng, Qi-Hang Peng, Xi-You Tang. On the Opti-

mum Number of Users in Collaborative Spectrum Sensing with Reporting Channel Error [J]. Signal Processing, 2011, 27(3):444-449. (in Chinese)

- [10] Cordeiro C, Challapali K, Birru D, et al. IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios [C]//Proceedings of 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, MD, USA. 2005:328-339.

作者简介



秦 臻(1972-),男,出生于陕西省西安市,现为西安电子科技大学博士研究生,主要从事模式识别和智能系统、无线通信、信息系统规划与优化等方向研究。
E-mail:qinzhen_2005@hotmail.com



薛 峰(1972-),男,出生于四川省成都市,湖北省无线电管理委员会工作。主要从事认知无线电、电磁频谱技术、无线通信工程等方面工作。
E-mail:xueboen@gmail.com



梁继民(1971-),男,出生于河南省偃师市,西安电子科技大学工程学院教授,博士生导师。长期从事信息融合、医学影像处理和模式识别基础理论与技术应用研究,主持完成多项国家自然科学基金、武器装备预研基金等项目。在国际学术期刊上发表 SCI 检索学术论文 46 篇,获得授权国家发明专利 9 项。E-mail:jimleung@mail.xidian.edu.cn