

文章编号:1671-6833(2013)01-0116-05

# 基于 SNR 比较的协作感知用户选择问题的研究

杨守义, 白文娟, 付亚楠

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**在实际情况的认知无线电环境下,由于认知用户的感知可靠性存在差异,并不是参与协作的认知用户越多,感知性能越好.综合考虑协作的必要性与协作的增益两方面因素,提出了一种基于信噪比(SNR)比较的协作感知用户选择方案.理论分析及仿真结果一致表明:该方法在有效地提高频谱感知检测性能的同时,减小了参与协作感知的用户数目,提高了协作效率.

**关键词:**认知无线电;协作频谱感知;用户选择;信噪比

**中图分类号:** TN92 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.028

## 0 引言

频谱感知是认知无线电(CR)系统<sup>[1]</sup>的关键技术之一.目前已有的频谱感知技术主要分为非协作和协作检测两大类.一般而言,协作检测因为融合了多个认知用户(CU)的检测信息,能够提高频谱感知的准确性与可靠性.尤其是在深度衰落的环境下,感知性能明显优于非协作检测<sup>[2]</sup>.但是在协作频谱感知技术中对协作必要性、协作用户的选择以及协作的增益的研究仍然很不成熟.文献[2-4]提出了多种协作频谱检测方案,以提高感知结果的准确性与可靠性.但是它们假设所有CU具有相同的信噪比和检测概率,没有考虑CU的可靠性差异.文献[5]在所有的CU都具有相同的检测性能的前提下研究了“K秩”准则下认知网络中最优协作CU数目.文献[6]考虑了路径损耗的影响,提出了一种自适应门限来确定最优的协作CU数,但没有考虑协作的必要性.然而,在实际的系统环境下,并不是所有CU都需要协作,协作用户数增加不仅会增加协作开销,而且并不是任何用户之间协作都可以提高感知性能,协作用户选择不合理甚至降低频谱感知性能.因此,单节点用户的协作必要性是笔者研究的重点.笔者综合考虑了协作的必要性与协作的增益,提出一种基于SNR比较的协作感知用户选择方案.仿真结果证明,该方法不仅提高了检测性能,而且

减小了开销,提高了协作效率.

## 1 本地频谱感知模型

传统频谱感知通常采用二元假设模型<sup>[3]</sup>,假设感知网络有N个认知用户,任意一个认知用户i接收到的信号 $y_i(n)$ 有如下两种情况:

$$y_i(n) = \begin{cases} u_i(n), & H_0; \\ h_i(n)s(n) + u_i(n), & H_1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H_1, H_0$ 分别表示授权用户存在和不存在; $u_i(n)$ 是均值为0,方差为 $\sigma_u^2$ 的高斯白噪声; $s(n)$ 是授权用户信号; $h_i(n)$ 为感知信道增益,且 $|h_i(n)|$ 服从瑞利分布.假设每个认知用户均采用能量检测进行频谱感知,其检测统计量为

$$T_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_i(n)|^2, i = 1, 2, \dots, K. \quad (2)$$

式中: $N$ 为感知时间 $\tau$ 内的采样点数.假设授权用户为复数值PSK调制信号,噪声服从周期循环复高斯(CSCG).当 $N$ 足够大,利用中心极限定理可得认知用户的虚警及检测概率<sup>[3]</sup>:

$$P_{f,i}(\epsilon_i, \tau) = P(T_i > \epsilon_i | H_0) = Q\left(\left(\frac{\epsilon_i}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_i}\right). \quad (3)$$

$$P_{d,i}(\epsilon_i, \tau) = P(T_i > \epsilon_i | H_1) = Q\left(\left(\frac{\epsilon_i}{\sigma_u^2} - \gamma_i - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_i}{2\gamma_i + 1}}\right). \quad (4)$$

收稿日期:2012-09-20;修订日期:2012-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60702020):多用户MIMO-OFDM系统无线资源管理技术的研究

作者简介:杨守义(1965-),男,河南民权人,郑州大学教授,博士生导师,主要研究方向为信源编码、宽带无线通信(DFDM, MIMO)、图像数字水印等, E-mail: iesyyang@zzu.edu.cn.

式中:  $\varepsilon_i$  表示认知用户的判决门限;  $\gamma_i = \frac{E(|s(n)|^2 | h_i(n)|^2)}{\sigma_u^2}$  为每个认知用户接收到的平均信噪比;  $Q(\cdot)$  是服从完全的标准高斯分布函数:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (5)$$

可以从两个不同的角度对频谱感知性能进行优化与分析<sup>[7]</sup>:

(1) 从授权用户角度,为保证授权用户尽可能不受认知用户干扰,固定认知用户目标检测概率  $\bar{P}_d$ ,在保证此检测概率的基础上最小化虚警概率,尽量提高认知用户对空闲频谱的利用率,增加认知用户传输机会.通过(4)式可以求出每个认知用户的判决门限,代入(3)式求得虚警概率为

$$P_{f,i} = Q(\sqrt{2\gamma_i + 1}Q^{-1}(\bar{P}_d) + \sqrt{\tau f_i \gamma_i}). \quad (6)$$

(2) 从认知用户角度,为保证认知用户的传输机会,应确定一个较小的虚警概率,即给定一个目标虚警概率  $\bar{P}_f$ ,在保证此虚警概率的基础上最大化检测概率.则每个认知用户的检测概率为

$$P_{d,i} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2\gamma_i + 1}}Q^{-1}(\bar{P}_f) - \sqrt{\tau f_i \gamma_i}\right). \quad (7)$$

## 2 基于 SNR 比较的协作感知

笔者采用集中式协作感知模型,协作感知网络由 1 个授权用户、多个认知用户和具备数据处理功能的融合中心组成.协作感知过程如图 1 所示:每个认知用户在感知信道感知授权用户信号,同时对接收到的信噪比进行估计;认知用户将自身感知判决结果以及信噪比估计值通过通知信道发至融合中心;融合中心利用用户选择算法,确定协作感知方案,并采用某种融合策略进行数据融合,最终判决授权用户是否存在.

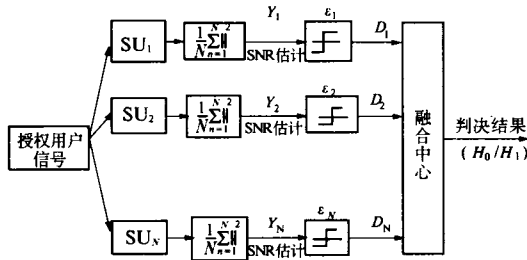


图 1 基于 SNR 比较的协作感知模型

Fig.1 Cooperative Spectrum Sensing mode based on SNR

### 2.1 基于 SNR 比较的用户选择算法

认知用户接收到授权用户的 SNR 不同导致

每个认知用户之间检测的可靠性存在差异.为了改善频谱感知性能,需要解决两个问题:对于任意一个认知用户它是否需要协作?若此认知用户需要得到其他认知用户的帮忙共同参与感知,与哪些用户协作能更有效的提高感知的性能?

为解决上述问题,笔者在数据融合中心设计了用户选择方案.假设所有认知用户都具备 SNR 估计功能,与传统的协作感知相比,认知用户除了发送本地感知判决外,还需发送 SNR 估计到融合中心.用户选择算法具体流程如图 2 所示.

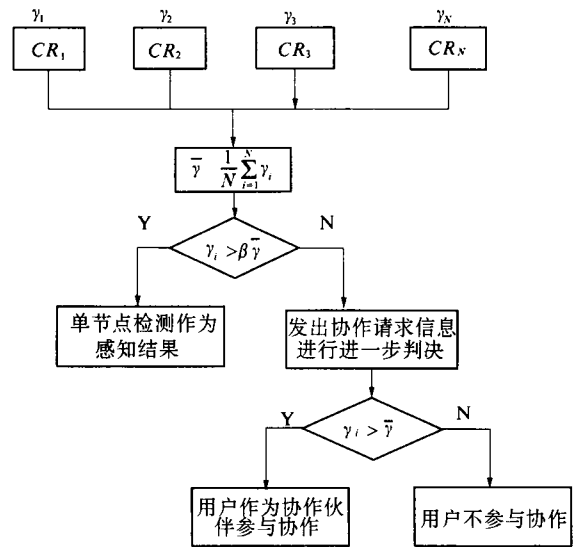


图 2 用户选择算法流程图

Fig.2 Flowchart of Partner Selection

每个认知用户将本地判决结果和 SNR 估计一同发送到融合中心,在融合中心对所有认知用户的信噪比求均值  $\bar{\gamma}$ .若某一用户需要使用授权频带而进行频谱感知,首先与  $\beta\bar{\gamma}$  进行比较,若此认知用户的 SNR 大于  $\beta\bar{\gamma}$ ,则该认知用户的检测可靠性很高,不需协作感知,其本地判决即可为最终感知结果;若此认知用户的 SNR 小于  $\beta\bar{\gamma}$ ,则该认知用户的检测性能不满足认知系统的要求,需发出协作请求,寻找其他认知用户协作感知.选择协作伙伴时,每个认知用户均与平均信噪比比较,若认知用户  $i$  的信噪比  $\gamma_i > \bar{\gamma}$ ,则认知用户  $i$  作为协作伙伴参与感知,否则不参与协作. $\beta$  为调整因子,根据认知网络对检测可靠性要求的差异性,可以动态地做出调整.

### 2.2 融合准则的选择与协作效率的判定

协作频谱感知主要采用的融合准则有“或”、“与”和“K 秩”<sup>[7]</sup>。“K 秩”准则可描述如下:

$$Q_f = \sum_{j=k}^n \sum_{\sum_{u_i=j}^n} \prod_{i=1}^n (P_{f,i})^{D_i} (1 - P_{f,i})^{1-D_i}; \quad (8)$$

$$Q_d = \sum_{j=k}^n \sum_{\sum_{i=j}^n} \prod_{i=1}^n (P_{d,i})^{D_i} (1 - P_{d,i})^{1-D_i} \quad (9)$$

式中:  $P_{f,i}, P_{d,i}$  分别表示单个认知用户的虚警概率和检测概率;  $Q_f, Q_d$  分别表示协作感知后认知系统的虚警概率和检测概率;  $D_i$  为认知用户  $i$  的判决结果。

在协作感知过程中,资源消耗与参与协作感知数成正比。传统的协作感知认知网络中的认知用户全部参与协作。但协作必然带来开销,假设认知网络中一共有  $N$  个认知用户,如果只选出  $K$  个认知用户进行感知,那么整个认知用户网络的协作开销也会降低到原来的  $K/N$ <sup>[8]</sup>。因此可以定义一个参数,来表征协作感知系统的资源利用效率。即协作效率因子:  $\eta = 1 - K/N$ 。当  $K = N$  时  $\eta = 0$ ,即传统的协作频谱感知,协作效率最低, $K$  值越小效率越高。

### 2.3 吞吐量的确定

假设每一帧由感知时间  $\tau$  和数据传输时间  $T - \tau$  两部分构成。 $p(H_0)$  和  $p(H_1)$  分别表示授权用户不存在和存在的概率,  $c_0$  和  $c_1$  分别表示认知用户在授权用户不存在和存在时的吞吐量,则认知网络的平均吞吐量为<sup>[9]</sup>

$$R(\lambda, \tau) = R_0(\lambda, \tau) + R_1(\lambda, \tau) = \frac{T - \tau}{T} C_0 (1 - Q_f) P(H_0) + \frac{T - \tau}{T} C_1 (1 - Q_d) P(H_1) \quad (10)$$

文献[3]已证明  $R_0(\lambda, \tau) \gg R_1(\lambda, \tau)$ ,故认知网络的吞吐量可以用  $R_0(\lambda, \tau)$  近似表示:

$$R(\lambda, \tau) = R_0(\lambda, \tau) = \frac{T - \tau}{T} C_0 (1 - Q_f) P(H_0) \quad (11)$$

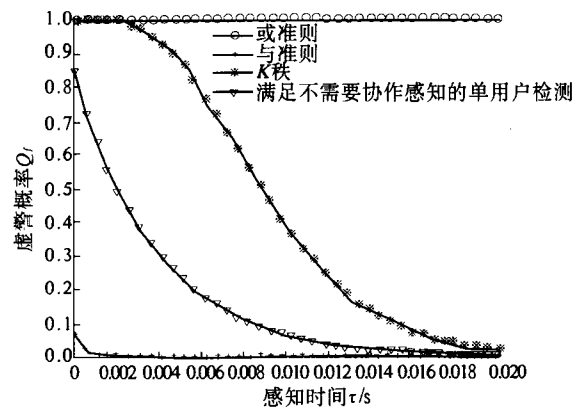
## 3 计算机仿真与结果分析

假设帧长  $T = 20$  ms, 抽样频率  $f_s = 6$  MHz,  $P(H_0) = 0.8$ , 认知用户数  $N = 20$ , 授权用户发出的信噪比为  $-20$  dB, 但经过信道传输后认知用户接收到的信噪比是各不相同的。笔者分别从保护授权用户不受干扰及保证认知用户对空闲频谱的利用率两方面, 仿真分析了传统的协作感知方法与经过用户选择改进后的协作感知方法中虚警概率、检测概率、吞吐量与感知时间的关系, 实验结果具体可描述如下。

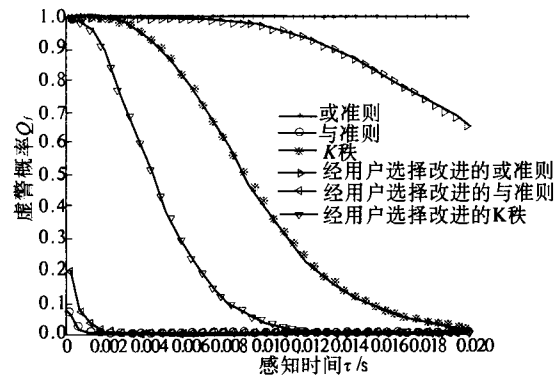
### 3.1 经用户选择算法改进的协作感知方案对虚警概率的影响

在讨论虚警概率与感知时间的关系时, 为保证授权用户不受干扰, 假设所有认知用户的检测

概率  $P_{d,i} = \bar{P}_d = 0.9$ <sup>[10]</sup>, 用户选择算法中的调整因子  $\beta = 1.5$ 。图3(a)表示某认知用户的信噪比  $\gamma > \beta\bar{\gamma}$ , 则根据用户选择算法其单一判决即为最终感知结果而无需协作; 图3(b)表示某认知用户的信噪比不满足  $\gamma > \beta\bar{\gamma}$ , 则需发出协作请求, 按笔者提出的选择算法寻找协作伙伴协作感知。



(a) 单用户感知



(b) 经用户选择改进方案

图3 单用户感知和经用户选择改进方案与传统协作感知虚警概率比较

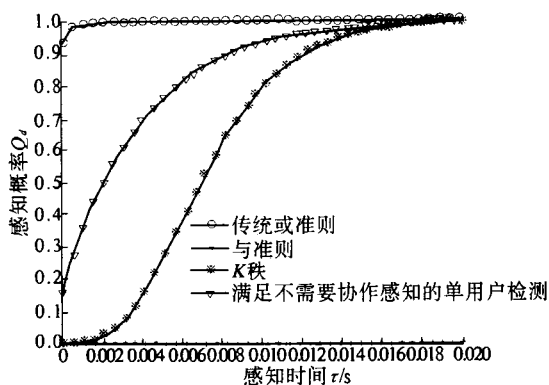
Fig.3 Comparison of probability of false alarm between non-cooperative and partner-selecting with traditional cooperative method

图3(a)和图3(b)表明,随着感知时间的增加,虚警概率不断减小,且笔者提出的改进方案与传统协作感知采用“或”准则和“K秩”准则相比,虚警概率明显变小,提高了认知用户对空闲频谱的利用率。

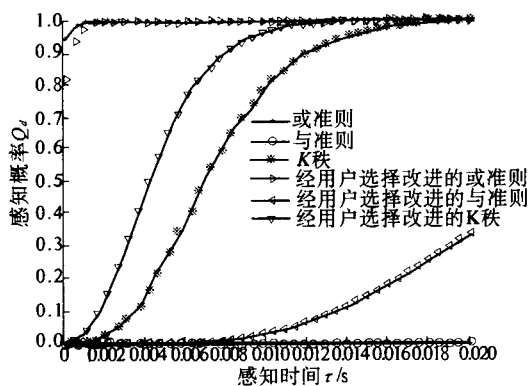
### 3.2 经用户选择算法改进的协作感知方案对检测概率的影响

在讨论检测概率与感知时间的关系时,为保证认知用户对频谱的利用率,假设所有认知用户的虚警概率  $P_{f,i} = \bar{P}_f = 0.1$ , 调整因子  $\beta = 1.5$ 。图4(a)表示某认知用户的信噪比  $\gamma > \beta\bar{\gamma}$ , 根据用户选择算法其单一判决即为最终的感知结果而无需

协作;图4(b)表示某认知用户的信噪比不满足  $\gamma > \beta\bar{\gamma}$ ,则需要发出协作请求,按照笔者提出的选择算法寻找协作伙伴进行协作感知。



(a) 单用户感知



(b) 经用户选择改进方案

图4 单用户感知和经用户选择改进方案与传统协作感知检测概率比较

Fig.4 Comparison of probability of detection between non-cooperatine and partner-selecting with traditional cooperative method

由图4(a)和图4(b)可以看出,随着感知时间的增加,检测概率不断增大,且笔者提出的改进方案与传统协作感知模型中采用“与”准则和“K秩”准则相比,在相同的感知时间其检测概率明显增大,降低了感知用户对授权用户的干扰。

### 3.3 经用户选择算法改进的协作感知方案对吞吐量的影响

由图3,4对比可知:采用“与”准则可以获得很低的虚警概率,但是其检测概率也非常低;“或”准则虽然能得到很高的检测概率,但是其虚警概率也相当的大.考虑到虚警概率与检测概率的权衡,“或”准则和“与”准则不适合用于实际的认知无线电环境中.故在考虑笔者提出的改进方法与传统的协作感知对吞吐量的影响时,只需要考虑“K秩”融合准则。

图5为笔者方法与传统协作感知方法吞吐量

比较,由图5可知:吞吐量为感知时间的单峰函数,笔者提出的方法与传统协作感知方法相比,归一化吞吐量的值得以提高,并且在达到吞吐量峰值时所需的感知时间要短。

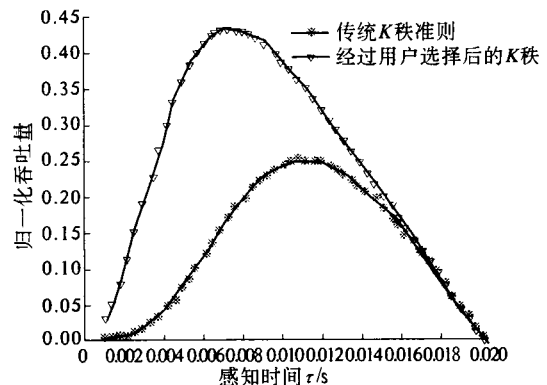


图5 本文方法与传统协作感知方法吞吐量比较

Fig.5 Comparison of throughput between partner-selecting and traditional cooperative method

## 4 结论

笔者在认知用户的感知可靠性存在差异的实际环境下,综合考虑协作的必要性与协作增益两方面因素,提出了基于SNR比较的协作感知用户选择方案.理论分析与仿真结果表明:笔者提出的改进方法能有效地降低虚警概率,提高检测概率和认知网络的吞吐量.提高了检测性能的同时,减小了协作开销,提高了协作效率。

## 参考文献:

- [1] MITOLA J, MAQUIRE G J. Cognitive radios: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] GHASEMI A, ELVINO S S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment [C]//IEEE DySPAN, 2005: 131-136.
- [3] PEH E, LIANG Y C, ZENG Y H. Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: A sensing throughput trade off view [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294-5299.
- [4] ZHANG Wei, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4761-4766.
- [5] YOU C, KWON H, HEO J. Cooperative TV spectrum sensing in cognitive radio for Wi-Fi networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(1): 62-67.

- [6] NA H, KIM S. Optimum number of secondary users in cooperative spectrum sensing using adaptive threshold [C]//IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, 2010: 52-56
- [7] PEH E, LIANG Y C. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007: 27-32.
- [8] CHEN Yun-fei. Optimum number of secondary users in collaborative spectrum sensing considering resources usage efficiency [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(12): 877-879.
- [9] LIANG Y C, ZANG Y, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [10] STOTAS S, NALLANATHAN A. On the throughput and spectrum sensing enhancement of opportunistic spectrum access cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 97-106.

## Research of Partner Selection in Cooperative Spectrum Sensing Based on SNR Comparison

YANG Shou-yi, BAI Wen-juan, FU Ya-nan

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In a practical circumstance, because the reliability of each cognitive user's local sensing result is different, the detection performance cannot be improved with the increase of the number of participating users. In consideration of the necessity of cooperation and collaboration gain, a new scheme-partner selection in cooperative spectrum sensing based on SNR comparison is proposed. Theoretic analysis and computer simulation show that the proposed scheme improves the detection performance and reduces the number of cognitive users which participate cooperative spectrum sensing at the same time, so this new scheme can improve the efficiency of cooperation.

**Key words:** cognitive radio; cooperative spectrum sensing; partner selection; signal to noise ratio (SNR)

(上接第 115 页)

## Research on a New Algorithm of Spread Spectrum Acquisition to Conquer Effect of Residual Code Phase Offset

WANG Zhi-yang<sup>1</sup>, YANG Ji-long<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, Bengbu 233030, China; 2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** This paper firstly analyzes and simulates the relational performance of the conventional noncoherent synchronization system. According to the bad impact on acquisition performance by the effect of residual code phase offset, it proves that the sum of the two successive matched filter outputs can conquer the effect if  $1/\Delta$  is integral. Based on the scheme and conventional design, it puts forward a new algorithm of noncoherent synchronization spread spectrum acquisition. Many results and simulations are also given to show that the proposed algorithm has better performance than the conventional design.

**Key words:** spread spectrum communication; noncoherent synchronization; effect of residual code phase offset; PN code acquisition; matched filter