

基于信任度加权的合作频谱感知算法^{*}

杨铁军, 司春丽

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为进一步提高认知无线电频谱感知性能, 提出一种基于信任度加权的软合并感知算法 TWCS (trust weighted cooperation sensing)。该算法首先定义一个模糊型指数信任度函数, 对两认知用户间的信任程度进行量化处理, 并通过信任度矩阵度量各认知用户测得数据的综合信任程度, 以合理分配测得数据在融合过程中所占权重。仿真结果表明, 与最大比合并和信噪比加权合并等算法相比, TWCS 算法不仅具有更强的可靠性, 而且使系统整体感知性能得到了较大提高。

关键词: 信任度加权; 指数函数; 软合并; 协作频谱感知; 认知无线电

中图分类号: TN911; TP301.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3124-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.084

Weighted cooperative spectrum sensing algorithm based on trust

YANG Tie-jun, SI Chun-li

(College of Information Science & Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To further improve cognitive radio spectrum sensing performance, this paper proposed the weighted cooperative spectrum sensing algorithm based on the trust (TWCS). It defined an index trust function of fuzzy firstly to quantize the level of trust between the two cognitive users, then measured the comprehensive trust level of data each cognitive user sensed using trust matrix, in which weights of data sensed in the fusion process were distributed reasonably. The simulation results show that the TWCS algorithm has the more strong reliability and can greatly improve the system sensing performance compared with the maximum ratio combining method and SNR weighted combinations algorithm.

Key words: trust weighted; index function; soft combining; cooperative spectrum sensing; cognitive radio (CR)

0 引言

当前, 随着无线通信业务的飞速发展, 频谱资源的稀缺成为迫切需要解决的问题。而频谱资源是由政府相关部门采用固定分配模式分配给每个授权用户, 但通过调查可知, 在一定的空间和时间内只有 15% ~ 85% 的频谱资源被授权用户使用, 可见频谱的利用率非常低^[1,2]。

为了解决这个问题, 人们提出了认知无线电 (CR) 技术。该技术的出现改变了授权用户独享频段的使用方式, 其核心思想是认知用户通过检测频谱空洞, 机会性地接入授权用户暂时不用的空闲频段, 并在主用户返回时迅速地退出信道, 以避免对主用户造成干扰, 以此实现频谱资源的共享。对频谱空洞的检测即是频谱感知, 是实现认知无线电技术的关键。目前, 主要有两种频谱感知方法: a) 单用户频谱感知方法, 如匹配滤波器检测、能量检测以及周期特性检测等^[3]; b) 合作频谱感知方法^[4], 即多个认知用户同时进行感知。考虑信道中衰落、阴影等因素的严重影响, 采用合作感知方法可以提高感知性能。合作感知下, 各认知用户的本地检测信息通过控制信道传送到融合中心, 在根据某种融合规则对是否存在主用户作出最终判决。软合并的合作感知相对于硬合并具有较好的性能, 越来越

受到学者的重视。文献[5]提出一种等增益 (EGC) 合并的软合并算法, 为每个认知用户分配相同的权值, 仿真分析表明该算法提高了感知能力, 但采用统一的权值分配不合理。文献[6]考虑到每个认知用户信噪比不同对检测结果的影响也不同, 提出基于信噪比加权的软合并方法, 为不同信噪比的认知用户分配不同的权值, 与等增益算法相比, 检测性能得到提高。

本文提出一种新的加权软合并算法 TWCS, 以指数形式的信任度函数作为权值, 考虑每个认知用户信任度不同以及指数函数的特性, 可以使信任度高的认知用户分配较大的权值, 信任度低的认知用户分配较小的权值, 由此降低信任度较低的认知用户对检测结果的影响, 有效提高检测性能。本文在 AWGN 信道和 Rayleigh 信道下, 将 TWCS 算法与 EGC、基于信噪比加权软合并算法和最大比合并算法进行了仿真比较。

1 系统模型分析

1.1 协作感知模型

本文使用的系统模型如图 1 所示, 采用集中式的认知用户网络, 该模型由主用户和认知用户网络组成, 认知用户网络包括认知用户基站 (BS) 即融合中心, 和 N 个认知用户, N 个认知

收稿日期: 2011-11-24; **修回日期:** 2011-12-27 **基金项目:** 河南省科技创新杰出青年基金资助项目 (104100510008); 河南工业大学研究生教育创新计划基金资助项目 (10YJS038)

作者简介: 杨铁军 (1975-), 男, 河南信阳人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为无线通信和通信信号处理; 司春丽 (1987-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为认知无线电 (chunli87@163.com)。

其中: $S_1, S_2, \dots, S_N$ 分别表示 N 个认知用户的检测数据, $E_1, E_2, \dots, E_N$ 分别为各个认知用户处理过的能量值; $w_1, w_2, \dots, w_N$ 表示每个认知用户的权值, D 表示最终的融合结果。每个认知用户同时并且独立地进行本地频谱检测, 并将检测能量值与各自的权值相乘后发送至融合中心^[10,11], 由融合中心作出最终的判决。

检测统计量 Y 是 N 个认知用户检测结果的加权和, 即 $Y = \sum_{i=1}^N w_i E_i$, 在融合中心处将检测统计量与门限值进行比较, 作出主用户是否存在的判决。

本文采用 TWCS 算法, 其思想是: 以指数形式的信任度进行权值计算, 即采用单个认知用户指数形式的信任度与多个认知用户合作指数形式的信任度算术平均的比值作为权值, 从而更合理地给每个认知用户分配权值。

假设有 N 个认知用户参与合作检测, 并且其信噪比分别为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$, 则采用 TWCS 算法计算第 i 个认知用户的权值为

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^N b_{ij}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij}} \quad (13)$$

由式中可知, 权值计算的基本单位是信号的指数形式, 其值随着自变量的增大而逐渐减小, 即随着信任度的减小而逐渐减小, 与漏警概率随着信噪比的减小而逐渐减小的特性相类似, 具有很好的拟合性。

由式(3)可知, 检测统计量 $Y = \sum_{i=1}^N w_i E_i$ 在 H_0 和 H_1 下也服从中心卡方分布和非中心卡方分布, 其中自由度为 $2Nu$ 。

$$Y = \sum_{i=1}^N w_i E_i = \begin{cases} \chi_{2Nu}^2 & H_0 \\ \chi_{2Nu}^2(2\gamma_i) & H_1 \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\gamma_i = \sum_{i=1}^N w_i \gamma_i$ 。

将式(8)代入式(4)(6)可得 AWGN 信道下 TWCS 算法的检测概率和虚警概率分别为

$$Q_d = P\{Y > \lambda / H_1\} = Q_{Nu}(\sqrt{2\gamma_i}, \sqrt{\lambda}) \quad (15)$$

$$Q_f = P\{Y > \lambda / H_0\} = \frac{\Gamma(Nu, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(Nu)} \quad (16)$$

漏警概率为

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (17)$$

在 Rayleigh 信道下, γ_i 的概率密度函数为^[12]

$$f_{\gamma_i}(x) = \frac{x^{N-1} e^{-(x/\gamma_w)}}{\Gamma(N) \gamma_w^N} \quad (18)$$

其中: γ_w 为 Rayleigh 信道下信任度加权软合并算法感知的平均信噪比, 即为

$$\gamma_w = \frac{\gamma}{N} \sum_{i=1}^N w_i = \frac{w \gamma}{N} \quad (19)$$

将式(18)(19)及(15)代入式(7)可得 Rayleigh 信道下 TWCS 算法感知的检测概率为

$$P_{d/\text{Ray}} = \int_{\gamma} Q_{Nu}(\sqrt{2x}, \sqrt{\lambda}) f_{\gamma_i}(x) dx = H_R + \left(\frac{N}{N + w \gamma} \right)^N e^{-\frac{\lambda}{2}} \times$$

$$\sum_{i=1}^{Nu-1} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^i \frac{1}{i!} {}_1F_1(N; i+1; -\frac{w \gamma}{N + w \gamma}) \quad (20)$$

其中: ${}_1F_1$ 是合流超几何函数; $\bar{\gamma}$ 为认知用户信噪比的均值; H_R 为

$$H_R = \left(\frac{w \gamma}{N + w \gamma} \right)^N e^{-\frac{N}{N + w \gamma}} \left[\sum_{k=0}^{N-1} \zeta \left(\frac{N}{N + w \gamma} \right)^k \times L_k \left(-\frac{\lambda}{2} \frac{w \gamma}{N + w \gamma} \right) \right] \quad (21)$$

其中: $L_n(\cdot)$ 是度为 n 的拉格尔多项式^[13], 且当 $k = N-1$ 时, $\zeta = 1 + \frac{N}{w \gamma}$, k 为其他数时, $\zeta = 1$ 。

3 仿真结果及性能分析

本文为了验证 TWCS 算法的性能, 将该算法与 EGC 合并、最大比合并和基于信噪比加权的算法进行了比较, 并运用 MATLAB 在 AWGN 信道和 Rayleigh 信道下进行了仿真。设置仿真初始参数如下: 自由度 $u=5$, 合作用户数 $N=5$, 信噪比分别为 3、1、-1、2、-3 dB, $M=6$ 。

图3表示在 AWGN 信道下, TWCS 算法、信噪比加权算法、等增益合并和最大比合并算法的感知对比曲线。从仿真结果可以看出, TWCS 算法的漏警概率明显低于另外三种算法, 其中最大比合并算法的漏警概率又低于等增益合并和信噪比加权算法的漏警概率, 尤其在虚警概率较低的情况下, 这种差距更加明显。因漏警概率与检测概率的和为 1, 因此漏警概率越大则检测概率越小, 系统性能越差。如在虚警概率 Q_f 为 10^{-4} 时, TWCS 算法的漏警概率为 0.005, 采用最大比合并算法的漏警概率为 0.020 2, 采用信噪比加权算法的漏警概率为 0.036 1, 采用等增益合并算法的漏警概率为 0.039 4, 采用 TWCS 算法的漏警概率比采用最大比合并算法、信噪比加权算法和等增益合并算法的漏警概率分别降低 0.0152、0.0311、0.0344, 以 TWCS 算法性能最好。

图4表示 Rayleigh 信道下, TWCS 算法、信噪比加权算法、等增益合并和最大比合并算法的感知对比曲线。

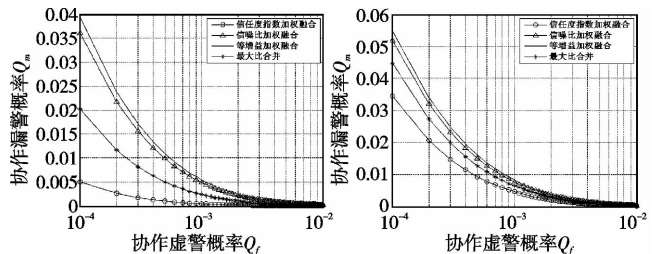


图3 AWGN信道下TWCS、信噪比加权、等增益合并和最大比合并感知对比曲线

从仿真曲线中可以得出, TWCS 算法的漏警概率明显小于信噪比加权算法、等增益合并和最大比合并算法的漏警概率, 并且这四种算法的漏警概率与 AWGN 信道下的漏警概率相比均增大。如在虚警概率 Q_f 为 10^{-4} 时, 采用 TWCS 算法的漏警概率为 0.034 4, 采用最大比合并算法的漏警概率为 0.044 8, 采用信噪比加权算法的漏警概率为 0.051 8, 采用等增益合并算法的漏警概率为 0.054 8, 采用 TWCS 算法的漏警概率比采用最大比合并算法、信噪比加权算法和等增益合并算法的漏警

图4 Rayleigh信道下TWCS、信噪比加权、等增益合并和最大比合并感知对比曲线

概率分别降低0.0104、0.0174、0.0204;并在 Q_f 为 10^{-4} 时,采用TWCS算法、信噪比加权算法、等增益合并和最大比合并算法的漏警概率相对于AWGN信道下的漏警概率分别增大了0.0294、0.0246、0.0157和0.0154。采用TWCS算法时,在两种信道下的漏警概率变化较大。

另外,由前面2.1节对信任度函数的分析可知,参数 M 的设定对信任度有着一定的影响,因此系统的检测性能也与参数 M 的选取有一定关系。通常情况下,参数 M 值越大,则被信任的认知用户越多,系统检测性能也越好。图5为不同 M 值下,虚警概率和检测概率的关系曲线。

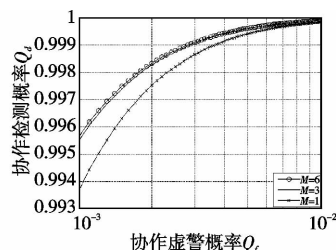


图5 不同 M 值时, TWCS算法中虚警概率和检测概率的关系曲线

由仿真图5可以看出,在相同的虚警概率下,随着 M 值的增大,系统的检测性能也随着提高,尤其在 M 值相差较大的情况下,这种差距较为明显; M 值相差较小时,这种差距比较小。因为 M 值减小导致参与协作感知的认知用户数也减少,因此, M 取值通常不宜过小,而且在协作用户数较多时才有较好的检测性能。如在虚警概率为 10^{-3} 时, $M=6$ 的情况下,检测概率 $Q_d=0.995$, $M=3$ 的情况下, $Q_d=0.9949$,只相差0.0001,而对 $M=1$ 的情况下,检测概率 $Q_d=0.9932$,与前两种情况相比,检测概率分别降低了0.0018和0.0017。

4 结束语

本文考虑到信任度不同的认知用户对感知结果的贡献程度不一样,提出一种新的认知无线电的合作频谱感知算法TWCS。该算法利用指数形式的信任度函数作为加权值,合理地给每个认知用户分配权值,信任度高的认知用户分配较大的权值,信任度低的认知用户分配较小的权值。该算法使系统的整体感知结果可靠性高,提高了系统的整体感知性能。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey

[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.

- [2] BANSAL G, JAHANGIR H M, KALIGINEEDI P, *et al.* Some research issues in cognitive radio networks[C]//Proc of the 8th IEEE AFRICON Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 1-7.
- [3] CABRIC D, TKACHENKO A, BRODERSEN R W. Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection[C]//Proc of IEEE Conference on Military Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 2347-2348.
- [4] UNNIKRISHNAN J, VEERAVALLI V V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 18-27.
- [5] 郭云玮, 刘全, 高俊. 协作感知下基于双门限能量检测的融合方案研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(12): 4723-4725.
- [6] 杨柯. 认知无线电中的合作检测及其综合判决算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 33-39.
- [7] GHASEMI A, SOUSA E S. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing[J]. *Journal of Communications*, 2007, 2(2): 71-82.
- [8] DIGHIM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 3575-3579.
- [9] 焦竹青, 熊伟丽, 张林, 等. 基于信任度的多传感器数据融合及其应用[J]. *东南大学学报*, 2008, 38(1): 253-257.
- [10] SHEN Bin, HUANG Long-yang, ZHAO Cheng-shi. Weighted cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proc of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 1074-1079.
- [11] WANG Ling-feng, WILLIAMS C, DOUFEXI A, *et al.* Weighted cooperative sensing for pulse radar signals[C]//Proc of IET Seminar on Wideband and Ultra Wideband Systems and Technologies: Evaluating Current Research and Development. 2008: 1-5.
- [12] Bin SHAHID M I, KAMRUZZAMAN J. Weighted soft decision for cooperative sensing in cognitive radio networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [13] WANG Li-jun, GUO Jian-ming, HAO Jing. The influence of multipath effect on low altitude cruise missile detection in radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2010, 8(1): 7-10.