



认知无线网络中基于 D-S 证据理论的合作频谱感知方法^{*}

谢树京^{1,2}, 沈连丰¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096; 2. 梧州学院电子信息工程系 梧州 543002)

摘 要: 认知无线网络因主从用户共享频谱资源, 具有频谱利用率高的优点, 同时对从用户提出了一定的要求。在研究 D-S 证据理论的基础上, 提出了一种新的合作频谱感知方法, 对冲突证据源和融合规则进行了修正, 并通过模糊度计算公式预估不确定性, 重新定义了基础概率分配(BPA)函数。仿真结果表明, 同“与”、“或”融合及以往的 D-S 融合方法相比, 所提方法能很好地感知认知无线网络的空闲频谱, 并可作为高斯白噪声(AWGN)信道及瑞利(Rayleigh)多径衰落信道等网络环境的通用频谱感知方法。

关键词: 认知无线网络; 频谱感知; D-S 证据理论

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.08.019

Cooperative Spectrum Sensing Based on Dempster-Shafer Theory of Evidence in Cognitive Radio Network

Xie Shujing^{1,2}, Shen Lianfeng¹

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Department of Electronic Information Engineering, Wuzhou University, Wuzhou 543002, China)

Abstract: Cognitive radio has the advantage of high spectrum utilization since the spectrum can be shared by primary and secondary user. Meanwhile, the new adaptable characteristic is required for the secondary user. On the basis of analyzing D-S theory of evidence, a novel distributed cooperative spectrum sensing scheme was presented, which modified the combination equation for conflicting evidence source, and the BPA function based on fuzzy degree calculation was redefined. Simulation results show that the proposed scheme can sense the available spectrum in the cognitive radio networks very well, and can be used as a general spectrum sensing scheme in AWGN and Rayleigh fading channel when compared with the traditional "and", "or" fusion rules and other D-S theory of evidence schemes in the previous literature.

Key words: cognitive radio network, spectrum sensing, dempster-shafer theory of evidence

1 引言

FCC (美国联邦通信委员会) 进行了一项频谱使用情况调查, 指出授权频谱在时间和空间上都没有得到充分利用^[1]。在这样的背景下, IEEE 组建了一个新的 WRAN 工作

组, 进行认知无线电相关技术的研究工作^[2]。与以往的固定频谱资源分配策略不同, 只要能保证网络的 QoS (服务质量), 认知无线网络中的从用户可以接入主用户的授权频谱并享用其频谱资源^[3]。因此, 从用户必须具备频谱感知的功能, 如果主用户正在使用当前频谱, 则从用户暂不接

^{*} 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2011ZX03005-004-03), 国家自然科学基金资助项目 (No. 61171081), 广西自然科学基金资助项目 (No.2011GXNSFB018075)

入或主用户能容忍的干扰范围内接入;如果主用户没有使用当前频谱,则从用户接入空闲频谱,但要在主用户返回使用频谱时及时退避。认知无线电技术能够使频谱资源得到充分利用,缓解频谱稀缺与无线通信业务对空闲频谱需求加剧之间的矛盾,因而受到越来越多的关注。

目前在认知无线网络频谱感知方面的研究工作主要介绍如下:

- 参考文献[4]提出了“与”融合、“或”融合规则的合作频谱感知,提高了系统的频谱感知性能;
- 参考文献[5, 6]通过优化感知时间使网络容量最大化;
- 参考文献[7]研究了 SFA(空间虚警概率)存在时,从用户对空闲频谱的感知概率;
- 参考文献[8, 9]分别研究了以概率密度函数(PDF)和累积分布函数(CDF)分析 BPA(basic probability assignment, 基础概率分配)函数的 D-S(dempster-shafer)合作频谱感知,并分析了两种方法在 AWGN(高斯白噪声)信道下的感知性能。

近来有研究指出,把主用户对频谱的使用情况存入数据库,从用户可以通过访问数据库知悉频谱状态,以代替频谱感知环节^[10]。这种方式下的主用户必须参与到认知网络频谱共享过程中,并协助配合,因此原主用户系统需要做出相应的调整 and 改变。

本文沿用传统的先感知、后接入的方法。为了克服隐藏终端和多径衰落造成的不利影响,由相距较近的若干从用户对同一频谱进行感知,将各自感知的结果按照修正的 D-S 证据理论融合,以形成最终的决断。该方法不论在 AWGN 信道还是 Rayleigh 多径衰落信道都具有较高的感知性能,对认知无线网络从用户接入频谱有重要意义。

2 基于 D-S 证据理论的合作感知

2.1 分布式合作感知模型

如图 1 所示,采用分布式的合作频谱感知方案。为了寻找主用户的空闲频谱,从用户在时域内检测对应频段接收信号的功率,将检测值与判决门限进行比较,判断主用户信号是否存在。圆形区间表示认知无线网络工作区域,区域内的几个从用户对同一频段进行合作感知。参与合作的从用户将感知结果集中到认知无线网络的中心节点(AP),AP 按照一定规则对各从用户的感知结果进行融合,得出主用户信号是否存在的最终判决。

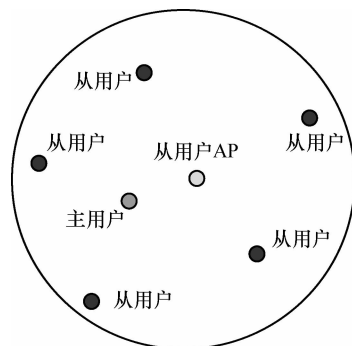


图 1 分布式合作频谱感知模型

从用户接收信号功率的估计值用检测统计量 Y_E 表示,具体为:

$$Y_E = (B/M) \sum_{j=1}^M |Y_j|^2 \quad (1)$$

其中, Y_j 表示接收信号的第 j 次采样, B 表示带宽, M 表示采样次数。当 M 足够大时,在假设检验信号不出现 (H_0) 和信号出现 (H_1) 两种条件下, Y_E 是服从如下分布的高斯随机变量:

$$Y \sim \begin{cases} N(\sigma_n^2, \sigma_n^4/M), & H_0 \text{ 情况下} \\ N(\sigma_n^2 + P_s, (\sigma_n^2 + P_s)^2/M), & H_1 \text{ 情况下} \end{cases} \quad (2)$$

其中, σ_n^2 表示噪声方差,同时也是噪声功率; P_s 是信号的发送功率,在 AWGN 信道下为常数,在 Rayleigh 信道下服从指数分布。

2.2 D-S 证据理论

采用 D-S 证据理论的合作感知流程与参考文献[9]相同。定义识别框架 A 为 $\{H_1, H_0, \Omega\}$, Ω 表示 A 的不确定区间。每个从用户感知过程结束后,都会对框架 A 中各命题构造一个 BPA 函数,即 $m_i(H_0)$ 、 $m_i(H_1)$ 和 $m_i(\Omega)$ 。两种假设 $m(H_1)$ 和 $m(H_0)$ 的最终 BPA 函数可以通过各从用户 BPA 函数按照 D-S 证据理论融合规则而得,两者中最终 BPA 较大的被判为真。

根据 D-S 证据理论,融合规则的方程表示为:

$$m(H_0) \cdots m_1 \oplus m_2 \oplus \cdots m_n(H_0) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cdots A_n = H_0} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1-k} \quad (3)$$

$$m(H_1) = m_1 \oplus m_2 \oplus \cdots m_n(H_1) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cdots A_n = H_1} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1-k} \quad (4)$$

$$k = \sum_{A_1 \cap A_2 \cdots A_n = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (5)$$

其中, $m_i(\cdot)$ 是合作感知中第 i 个从用户的 BPA 函数, $m(\cdot)$ 是融合后的最终 BPA 函数, k 为不一致因子, A_i 是合作



感知中第 i 个从用户的感知结果, 是框架 A 中的命题之一。融合后的最终判决准则用式(6)表示:

$$\begin{aligned} H_1 : m(H_1) &> m(H_0) \\ H_0 : m(H_1) &< m(H_0) \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到作为证据源的每个从用户 BPA 函数可靠性不同, 融合前将每个从用户 BPA 函数按信任度加权, 如式(7)、式(8)所示:

$$\begin{cases} m'_i(H_1) = \omega_i m_i(H_1) \\ m'_i(H_0) = \omega_i m_i(H_0) \\ m'_i(\Omega) = 1 - m'_i(H_1) - m'_i(H_0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{\max_i(\gamma_i)} \quad (8)$$

其中, r_i 是合作感知中第 i 个从用户的信噪比(SNR)。权重系数 ω_i 通过对检测统计量 Y_E 在两种假设检验中的均值之差进行归一化而得到。用加权之后的 BPA 函数替换原 BPA 函数, 经过式(3)~式(6)得到最终判决, 参考文献[9]将其定义为增强的 D-S, 在 AWGN 信道中得到的感知性能较参考文献[8]有所提高。

3 修正 BPA 函数和融合规则的 D-S 证据理论

3.1 针对证据冲突对融合规则进行修正

式(5)中的 k 为不一致因子, 用来反映融合过程中证据之间的冲突程度。证据之间的冲突越激烈, k 值越大。当 k 接近于 1 时, 证据高度冲突, 融合结果往往与融合前的期望结果相悖。例如, 两个从用户融合前的 BPA 函数分别为 $m_1(H_0)=0.99, m_1(H_1)=0.01, m_1(\Omega)=0, m_2(H_0)=0, m_2(H_1)=0.01, m_2(\Omega)=0.99$ 。根据式(5)计算得到 $k=m(\emptyset)=0.9999$, 将其代入式(3)和式(4)中, 得到融合后的 BPA 函数为 $m(H_0)=0, m(H_1)=0, m(\Omega)=0$ 。由判决准则式(6), 结论应该判为 H_1 , 即主用户信号出现。但从融合前的 BPA 函数看, 两个从用户感知结果分别支持 H_0 和 Ω 。这种情况下, 即便再多的从用户参与到融合过程中, 最终结论仍然支持命题 H_1 , 类似于一票否决制。

由式(3)和式(4)可见, 当 $k=1$ 时, 计算式分母为 0, 即证据完全冲突时, 无法使用 D-S 证据理论进行融合。忽略这个问题的方法是规定 $m(\emptyset)=0$, 但在不同证据融合的过程中得到空集 $\emptyset$ 的概率事实上并不为 0, 融合过程中 D-S 方法舍弃了这部分的概率值, 只通过乘以归一化系数 $1/(1-k)$ 对融合后的有效 BPA 进行补偿。为了避免出现分

母为 0, 兼顾融合过程中空集 $\emptyset$ 概率非 0 的事实, 将各从用户 BPA 函数取平均并乘以 k 实现补偿, 得到修正融合规则的 D-S, 如下:

$$m(H_1) = \sum_{A_1 \cap A_2 \dots A_m = H_1} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) + k \left(\sum_{i=1}^n m_i(H_1) / n \right) \quad (9)$$

$$m(H_0) = \sum_{A_1 \cap A_2 \dots A_m = H_0} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) + k \left(\sum_{i=1}^n m_i(H_0) / n \right) \quad (10)$$

其中, k 与式(5)中的定义一致, 修正后的融合规则在 k 取任意值的情况下均能正常操作, 较修正前的融合规则更加合适。

3.2 采用预估和模糊度计算式修正 BPA 函数

除了融合规则外, BPA 函数是影响 D-S 证据理论性能的另一项重要因素, 是融合前证据源可信度的自我评价。为了区分不确定和不信任, 各从用户可信度的预估计算式为:

$$p_i(H_1) = 1 - (F_{Y_{E_i}|H_1}(Y_{E_i}) + F_{Y_{E_i}|H_0}(Y_{E_i})) / 2 \quad (11)$$

$$p_i(H_0) = (F_{Y_{E_i}|H_1}(Y_{E_i}) + F_{Y_{E_i}|H_0}(Y_{E_i})) / 2 \quad (12)$$

其中, $F_{Y_{E_i}|H_1}(Y_{E_i})$ 和 $F_{Y_{E_i}|H_0}(Y_{E_i})$ 分别是检测统计量 Y_{E_i} 在两种假设下的 CDF。由此, 应用模糊度计算式预估不确定性命题的 BPA 函数为:

$$m_i^{\wedge}(\Omega) = p_i(H_1)p_i(H_0) \quad (13)$$

结合加权系数 ω_i , 应用模糊度计算式得到的 3 种命题 BPA 函数为:

$$m_i^*(H_1) = p_i(H_1)(1 - m_i^{\wedge}(\Omega))\omega_i \quad (14)$$

$$m_i^*(H_0) = p_i(H_0)(1 - m_i^{\wedge}(\Omega))\omega_i \quad (15)$$

$$m_i^*(\Omega) = 1 - m_i^*(H_1) - m_i^*(H_0) \quad (16)$$

通过可信度预估计算式和模糊度计算式得到的 BPA 函数, 能够更好地区分不确定和不可信, 经此修正的 BPA 函数更加精确。

3.3 融合规则和 BPA 函数均修正后的 D-S 证据理论

针对证据冲突修正融合规则和采用模糊度计算式修正 BPA 函数的 D-S 证据理论为:

$$m^*(H_1) = \sum_{A_1 \cap A_2 \dots A_m = H_1} \prod_{i=1}^n m_i^*(A_i) + k^* \left(\sum_{i=1}^n m_i^*(H_1) / n \right) \quad (17)$$

$$m^*(H_0) = \sum_{A_1 \cap A_2 \dots A_m = H_0} \prod_{i=1}^n m_i^*(A_i) + k^* \left(\sum_{i=1}^n m_i^*(H_0) / n \right) \quad (18)$$

$$k^* = \sum_{A_1 \cap A_2 \dots A_m = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i^*(A_i) \quad (19)$$

修正之后, 最终的判决准则为:

$$\begin{aligned} H_1: m^*(H_1) &> m^*(H_0) \\ H_0: m^*(H_1) &< m^*(H_0) \end{aligned} \quad (20)$$

其中,各函数添加“*”号表示对应修正后的结果。

4 仿真结果

仿照参考文献[8,9]仿真时,假设主用户信号为数字电视(DTV)信号。主用户出现的概率为 0.5,带宽为 6 MHz,从用户的感知时间是 50 μ s,仿真次数设置为 10 000 次。

AGWN 信道下,参考文献[8,9]中“与”融合、“或”融合和本文 D-S 融合规则得到的 ROC(接收者操作特征)曲线如图 2 所示。

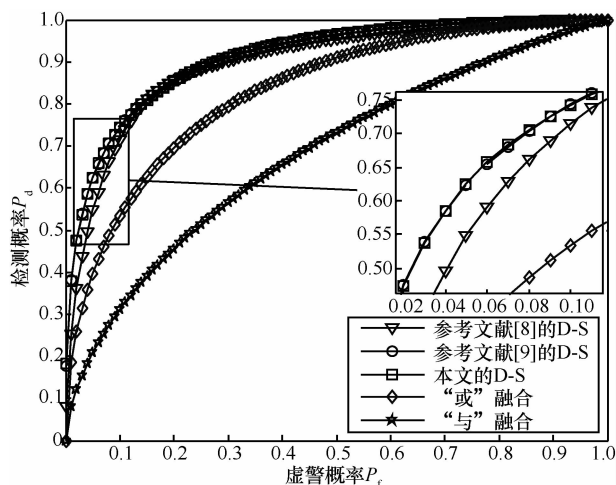


图2 AGWN 信道下,参考文献[8,9]“与”融合、“或”融合和本文 D-S 融合规则得到的 ROC 曲线

参与合作频谱感知的从用户有 5 个,SNR 分别为 -22 dB、-19 dB、-16 dB、-13 dB、-10 dB。根据 N-P(尼曼-皮尔逊)准则,在虚警概率相同的条件下,检测概率越高,检测性能越好,感知能力越强。由图 2 可以看出,本文 D-S 融合规则得到的感知性能与参考文献[9]一样,是最好的,稍微差一点的是参考文献[8],而“或”融合及“与”融合规则得到的感知性能均比基于 D-S 的合作频谱感知低很多。在仿真参数相同的条件下,在参考文献[9]中,对参考文献[8]进行感知性能重现时发生了偏差,当取值 0.1 时,图 2 中参考文献[8]的实际超过了 0.7,而参考文献[9]中所重现的是 0.65,即对比参考文献[8]与参考文献[9]的感知性能时,改进并没有参考文献[9]中体现得那么多。

Rayleigh 信道下,参考文献[9]和本文 D-S 融合规则得到的 ROC 曲线如图 3 所示。其他参数与图 2 的相同。从图 3 可以看出,在 Rayleigh 信道下,本文 D-S 融合规则得到的感知性能要略优于参考文献[9]。

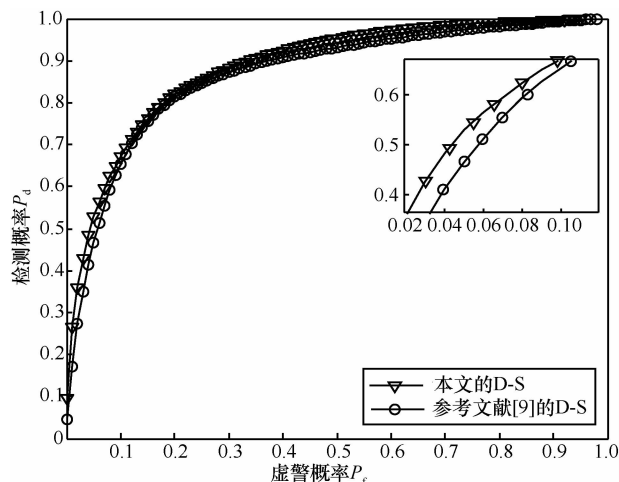


图3 Rayleigh 信道下,参考文献[9]和本文 D-S 融合规则得到的 ROC 曲线

AGWN 信道下,假定 4 个参与合作频谱感知的从用户 SNR 在 -22~-19 dB 范围均匀分布,第 5 个参与合作频谱感知的从用户 SNR 的变化范围为 -20~0 dB,参考文献[9]和本文 D-S 融合规则得到的总错误概率如图 4 所示。总错误概率等于虚警概率 P_f 和漏检概率 $P_m(1-P_d)$ 之和,应当是越小越好。可以看到,在图 2 中参考文献[9]与本文 D-S 融合规则所得到的 ROC 性能同为最优,但在图 4 中本文 D-S 融合规则所得到的总错误概率要明显低于参考文献[9]中所得。综上所述,本文所提出的经过修正的 D-S 证据理论在 AGWN 信道和 Rayleigh 信道中均有最佳的合作频谱感知性能。

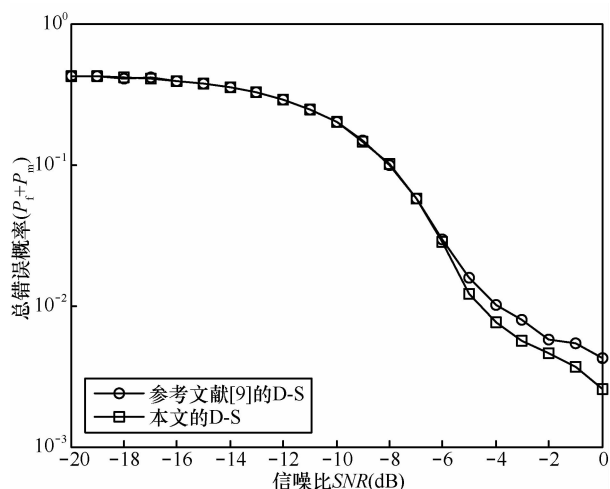


图4 参考文献[9]和本文 D-S 融合规则得到的总错误概率曲线

5 结束语

本文提出的分布式合作频谱感知,融合规则采用修正

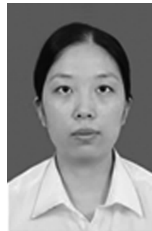


的 D-S 证据理论。在原 D-S 证据理论的基础上,对证据冲突导致融合规则失效的情况,修正了融合规则对应的计算式;在 BPA 函数的构造中,对各证据源按信任度进行加权,同时利用模糊度计算式对不确定性进行预估,更好地区分了证据源的确定性与不确定性,保证了基础概率分配的精度。仿真表明,本文 D-S 证据理论进行合作频谱感知时无需主用户的参与和协助,且在 AGWN 和 Rayleigh 信道下得到的频谱感知性能较传统“与”融合、“或”融合及同类方法更好,可以作为认知无线网络频谱感知的通用方法,很好地适用于需要频谱资源共享的网络环境。

参考文献

- 1 Federal Communications Commission. Spectrum Policy Task Force. Rep ET Docket No 02-135, 2002
- 2 Carlos C, Kiran C, Dagnachew B, *et al.* IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. Proceedings of 1st IEEE Symp New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, USA, 2005
- 3 Zhao Q, Sadler B. A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24 (3)
- 4 Sun C H, Zhang W, Letaief K B. Cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems. IEEE ICC'07, Glasgow, Scotland, 2007
- 5 Stotas S, Nallanathan A. On the throughput and spectrum sensing enhancement of opportunistic spectrum access cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1)
- 6 Yin W S, Ren P Y, Du Q H, *et al.* Delay and throughput oriented continuous spectrum sensing schemes in cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6)
- 7 Han W J, Li J D, Liu Q, *et al.* Spatial false alarms in cognitive radio. IEEE Communications Letters, 2011, 15 (5)
- 8 Peng Q H, Zeng K, Wang J. *et al.* A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory. Proceedings of the 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Finlandia Hall, Finland, 2006
- 9 Nhan N T, Insoo K. An enhanced cooperative spectrum sensing scheme based on evidence. IEEE Communications Letters, 2009, 13(7)
- 10 Vartiainen J, Hoyhtya M, Lehtomaki J, *et al.* Priority channel selection based on detection history database. Proceedings of the 5th CrownCom, Orlando, USA, 2010

[作者简介]



谢树京,女,梧州学院电子信息工程系电子信息工程专业教研室主任、讲师,主要研究方向为认知无线网络的频谱检测、频谱接入技术。



沈连丰,男,东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信技术。

(收稿日期:2013-05-14)

(上接第 84 页)

- 融合化:安全管理不是一个独立的体系,应与现运维管理、内部控制等现有制度和流程相融合,借鉴 PMP、ITIL、隐私数据保护等管理思想或方法的长处。

5 结束语

用户信息安全保护体系的建设并非一日之功,需要进行长期有序的建设和完善,随着下一代信息安全概念的提出和安全技术产品的不断完善,通信服务提供商通过强有力的管理组织领导、有效的激励措施,建立成功样板、问题发现和不断改进完善等方式,一定可以构建符合自己特点的用

户信息安全保障体系。

参考文献

- 1 王育民,刘建伟.通信网的安全——理论与技术.西安:西安电子科技大学出版社,1999
- 2 刘天华,孙阳,朱宏峰.网络安全.北京:科学出版社,2010
- 3 佟大柱.网络环境下的个人信息安全与保护探讨.网络安全技术与应用,2012(8):1009~6833
- 4 石玉春,张蕾.个人信息保护:互联网管理亟待解决的问题.中国通信业,2012(8): 1671~3060

(收稿日期:2013-08-01)