

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1303 - 05

基于改进 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法*

王苗苗, 李世银, 肖淑艳, 孙科建, 崔磊

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 在把 D-S 证据理论应用于多节点的频谱感知数据融合时, 如果数据冲突较大则融合结果并不理想。为了解决上述问题, 对 D-S 证据理论的证据组合规则进行了改进, 给出了一个在数据冲突大时也适用的数据融合公式, 并把这种改进的数据融合算法应用到多节点协作频谱感知中。MATLAB 仿真测试与结果分析表明改进算法提高了频谱感知性能。

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 改进 D-S 证据理论; 数据融合

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.016

Cognitive Radio Spectrum Sensing Algorithm Based on Improved D-S Evidence Theory

WANG Miao-miao, LI Shi-yin, XIAO Shu-yan, SUN Ke-jian, CUI Lei

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: When the data fusion algorithm based on D-S evidence theory is used in the integration of data collected by multiple nodes, the fusion effect of the D-S evidence theory is not good if the data is conflict seriously. In order to solve the problem, the evidence combination rule of D-S evidence theory is improved and a new data fusion formula which is also applicable when the data is conflict seriously is provided. The improved algorithm is applied to the cooperation of spectrum sensing algorithm. MATLAB simulation and analysis demonstrate the spectrum sensing performance is improved by using the proposed algorithm.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; improved D-S fusion rule; information fusion rule

1 引言

频谱感知技术是认知无线电 (Cognitive Radio, CR)^[1] 的一个关键组成部分。认知无线电通过对频谱进行不断检测来发现频谱空穴, 并利用频谱空穴进行通信。当频谱感知技术不能有效检测授权频段内的合法用户信号时, 使用认知无线电功能的无线设备必然会对工作在同一频段的其他设备造成干扰, 因此准确、可靠、连续的频谱感知技术是认知无

线电的基础, 是实现频谱管理、频谱共享等认知无线电应用的前提。

协作频谱感知是现在主要研究的频谱感知方法, 协作频谱检测技术要进行本地检测结果的交换和检测结果的融合, 根据控制信道带宽及发送到数据融合中心数据的不同, 可采用不同的数据融合算法。如果知道完整的或者压缩后的监测统计量、检测概率、虚警概率、信任度等信息, 可以采用更复杂有效的融合算法, 有人提出了把 D-S 证据理论应用

* 收稿日期: 2011 - 11 - 23; 修回日期: 2012 - 02 - 20

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金项目 (BY2009114); 徐州市科技计划项目 (XX10A001)

Foundation Item: The Innovation Foundation on Industry - University - Research Institute Collaboration of Jiangsu Province (2009114); Xuzhou Science and Technology Program (XX10A001)

到频谱感知的数据融合中。

D-S 证据理论作为一种不确定的推理算法,是 Dempster 于 1967 年最初提出的^[2],后由他的学生 Shafer 对证据理论做了进一步的研究,经过多年的发展,已经形成了可以处理由不知道所引起的不确定性的较完整的理论体系。在 CR 系统中,由于信道的随机性,也造成了接收端(SU)处对(PU)信号检测结果的不确定性,因此在分布式频谱检测算法的判决方法上,考虑采用 D-S 证据理论来综合处理来自各 SU 的检测信息能够取得相对较好的效果。文献[3-5]研究了基于 D-S 证据理论的协作频谱感知算法,验证了该算法的性能比传统算法有很大提高,但是并没有考虑到 D-S 证据理论有一定适合使用的条件,当任一接收端所接收的信号受到环境的严重干扰时,采用 D-S 证据理论会导致数据的证据冲突较大,从而不能取得理想的融合结果,甚至出现误判。针对 D-S 证据理论的缺陷,许多的学者提出对 D-S 证据理论进行修正^[6-14],我们可以考虑把改进的 D-S 证据理论应用于协作频谱感知的数据融合中。

2 D-S 证据理论的改进

2.1 D-S 证据理论

D-S 证据理论假设 Θ 是一有限集, Θ 的幂集 2^Θ 表示了所有可能的命题集。函数 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 如果满足下列条件:

$$\begin{aligned} m(\Phi) &= 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) &= 1 \end{aligned}$$

则其被称为基本概率分配(Basic Probability Assignment)。任意 $A \subseteq \Theta$, $m(A)$ 称为命题 A 的基本信任度分配。基本信任度分配函数反映了对 A 本身的信度大小,即支持命题 A 本身发生的程度。

证据组合将来自不同信息源的独立证据信息进行组合,产生比单一信息源更可靠的信息,因此,证据组合规则是证据理论的核心。如果这几批证据不是完全冲突的,多个信任分配函数的合成根据下面的合成规则来计算:设 m_1, m_2, \dots, m_n 是同一识别框架 Θ 上的 n 个信任分配函数,焦元分别为 $A_i (i = 1, 2, \dots, i, \dots, N)$, 则 D-S 合成规则为

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \Phi \\ \frac{\sum_{\cap A_i = A, 1 \leq i \leq n} m_i(A_i)}{1 - K}, & A \neq \Phi \end{cases} \quad (1)$$

其中, $K = \sum_{A \cap B_j = \Phi_i} m_1(A_i) m_2(B_j)$ 。

也可以每次运算都采用两个信任分配函数的合成,两两合成的结果再与下一个进行合并,类推可得到多个信任分配函数合成的结果。

这个利用合成规则计算得来的信任分配函数就可以作为在那几批证据联合作用下产生的信任分配函数。

2.2 D-S 证据理论的改进

在式(1)中 K 反映了各个证据之间的冲突程度,系数 $1/(1-K)$ 称为归一化因子。由 m 给定的信任分配函数称为 m_1 和 m_2 的正交和,记为 $m_1 \oplus m_2$ 。如果 $K < 1$ 不成立,则 $m_1 \oplus m_2$ 不存在,无法使用 D-S 证据理论进行融合。若 $K < 1$ 成立,在证据间的冲突较小(即 K 比较小)时,D-S 证据理论在大多数情况都可以得到较好的融合结果;而 K 接近于 1,即证据高度冲突时,组合结果又往往产生与直觉相悖的融合结论。

针对上述悖论的出现,为了解决证据高度冲突情况下多传感器信息的有效融合问题,众多研究人员为此作了大量的分析研究,提出了不少改进方法,这些改进方法无外乎两种思路:一种是对 Dempster 组合规则进行修正,另一种则是对冲突证据源进行修正^[6-14]。

针对经典的 D-S 证据理论在处理严重冲突和完全冲突证据时存在的问题,有如下改进方法^[15]:

$$\begin{cases} m(A) = 0, & A = \Phi \\ m(A) = \sum_{\cap A_i = A, 1 \leq i \leq n} m_i(A_i) + k \times q(A), & A \neq \Phi \end{cases} \quad (2)$$

其中, K 与公式(1)相同; $q(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(A)$, n 为证据源的个数。

把证据按各个命题的平均支持程度加权进行分配,在证据冲突较大时提高了合成结果的可靠性和合理性。但是改进的公式并不能取代 D-S 证据理论的重要性,在数据冲突较小的情况下仍然要采用 D-S 证据理论来进行数据的融合。为了使得融合算法在证据冲突无论大小时都适用,把公式(1)与公式(2)结合到一起,形成一种新的 D-S 证据理论的改进。新的算法进行数据融合时,首先设定一个门限值 λ , 然后求出数据之间的冲突系数 k 的大小,并与门限值比较,若 $k < \lambda$ 则采用公式(1);若 $k > \lambda$ 则采

用公式(2)。

本文改进 D-S 证据理论的数据融合公式如下:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \Phi \\ \frac{\sum_{\cap A_i = A, i \leq N} m_i(A_i)}{1 - K}, & k < \lambda, A \neq \Phi \\ \sum_{\cap A_i = A, i \leq N} m_i(A_i) + k \times q(A), & k > \lambda \end{cases} \quad (3)$$

其中, K 、 $q(A)$ 与公式(2)相同。

对于 λ 的取值,应根据实际情况而定。在本文中,通过大量的数据测试可知 λ 可以取为 0.9~0.92,若 λ 取值太小,本文改进算法的数据融合结果还不如未改进的理想;如果 λ 取值太大, k 值很难达到 λ 的大小,本文改进算法的数据融合结果与未改进的结果相同,失去了改进的意义。本文设定 $\lambda = 0.9$ 。

3 基于改进 D-S 证据理论的协作频谱感知算法

基于改进 D-S 证据理论的协作频谱感知框图如图 1 所示,主要包括检测节点 SU 的本地检测和 AP 节点的集中决策。

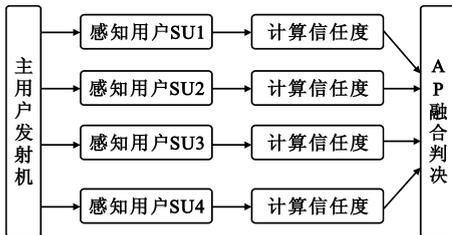


图 1 改进 D-S 证据理论的协作频谱感知框图
Fig. 1 Block diagram of cooperation spectrum sensing based on improved D-S evidence theory

3.1 检测节点 SU 的本地检测

本文对基于改进 D-S 证据理论的协作频谱感知算法是建立在本地检测节点 SU 采用能量检测算法上的。

本地节点 SU 进行能量检测得到累计能量 χ_{Ei} ,根据累计能量 χ_{Ei} 的统计特性,利用一定的规则^[3]计算出信任度 $m_i(H_0)$ 、 $m_i(H_1)$ 。

由焦元 H_0 和 H_1 组成的识别框架 Θ 中,检测节点 SU 对 H_0 和 H_1 这两种假设的信任度与对整个检测的不确定度应满足

$$m_i(H_0) + m_i(H_1) = 1 \quad (4)$$

为了满足这一条件,上述的信任度函数需要进行归一化处理。

3.2 AP 节点的集中决策

在 AP 收到来自各本地节点的检测结果 $\{m_i(H_1)m_i(H_0)\}$ 后,根据式(3),得到集合各 SU 的综合信任度 $\{m_i(H_1)m_i(H_0)\}$,然后利用适当的判决规则,作出 PU 信号存在与否的最终判决。

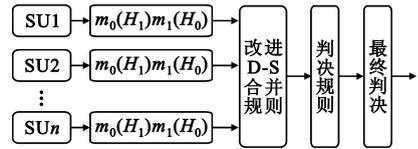


图 2 基于本文改进 D-S 证据理论的频谱感知算法
Fig. 2 Spectrum sensing algorithm based on improved D-S evidence theory in this paper

现以对与 SU 两个节点检测结果采用改进 D-S 合并为例,详细阐述图 2 中的改进 D-S 合并过程,更多节点的合并依次类推: SU1 的检测结果为 $m_1(H_0)m_1(H_1)$;SU2 的检测结果为 $m_2(H_0)m_2(H_1)$ 。

Step 1: K 值的计算

$$K = m_1(H_0) \times m_2(H_1) + m_1(H_1) \times m_2(H_0)$$

Step 2: 改进 D-S 合并中 $m(H_0)$ 的计算

$$m(H_0) = \begin{cases} \frac{m_1(H_0) \times m_2(H_0)}{1 - K}, & k < 0.9 \\ m_1(H_0) \times m_2(H_0) + k \times \frac{1}{2} (m_1(H_0) + m_1(H_0)), & k > 0.9 \end{cases}$$

Step 3: 改进 D-S 合并中 $m(H_1)$ 的计算

$$m(H_1) = \begin{cases} \frac{m_1(H_1) \times m_2(H_1)}{1 - K}, & k < 0.9 \\ m_1(H_1) \times m_2(H_1) + k \times \frac{1}{2} (m_1(H_1) + m_1(H_1)), & k > 0.9 \end{cases}$$

本文采用最大基本概率分配函数法作为本文的决策规则,具体判决规则如下:

$$\begin{cases} H_1: \frac{m(H_1)}{m(H_0)} \geq \eta \\ H_0: \frac{m(H_1)}{m(H_0)} < \eta \end{cases} \quad (5)$$

即:当经过融合的总检测对信号存在的可信度 $m(H_1)$ 与对信号不存在的可信度 $m(H_0)$ 的比值大于判决门限 η 时,则判决为有授权用户信号 PU 存在,否则认为 PU 不存在。而在具体的应用中,可以根据系统对检测概率和虚警概率的要求设置一个常量进行判决。

4 基于改进 D-S 证据理论的协作频谱感知算法的仿真分析

以检测概率为性能指标虽能够反映融合算法的性能优劣,但检测概率和虚警概率是在大量仿真次数上所得到的,在实际应用中,要判定某个时刻主用户是否存在,只有该时刻这一个时刻点,并不能进行多次取点进行仿真分析。本文在一个时刻点取一次数据对信号的存在性进行分析。

仿真中授权用户数为 1,协作检测的节点数为 4,检测节点 4 与授权用户发射机之间的信道受噪声干扰较大。

表 1 SU 与 AP 信任度
Table 1 Trust level of SU and AP

时刻	信任	SU1	SU2	SU3	SU4	AP 处 D-S 合并	AP 处 改进 D-S 合并
t_1	$m(H_1)$	0.652	0.976	0.880	0.939	0.999	0.999
t_2	$m(H_1)$	0.684	0.782	0.632	0.940	0.995	0.995
t_3	$m(H_1)$	0.824	0.728	0.812	0.087	0.848	0.838
t_4	$m(H_1)$	0.749	0.630	0.760	0.005	0.074	0.500
t_5	$m(H_1)$	0.173	0.351	0.191	0.353	0.014	0.014
t_6	$m(H_1)$	0.092	0.250	0.071	0.381	0.002	0.002

在表 1 中, $m(H_1)$ 为主用户存在的信任度, $m(H_0)$ 为主用户不存在的信任度,在 AP 处数据融合结果表示的是主用户存在的情况,当合并结果的 $m(H_1)/m(H_0)$ 大于某个门限值 η 时(门限值要根据实际情况来定,在本文中根据实际需要取 η 为 0.8),判决为主用户存在,否则判决为主用户不存在。在 t_1, t_2 和 t_3 时刻,4 个 SU 所检测的结果全是主用户存在的信任度比较大,AP 处合并结果显示主用户存在。在 t_4 时刻, SU1、SU2 和 SU3 处检测结果是主用户存在的信任度较大,而 SU4 处,由于信道中信道衰落或者多径效应等的影响,干扰较大,导致 SU4 的 $m(H_1)$ 为 0.01,主用户存在的信任度较小,在 AP 处采用“D-S”合并,其判决结果显示:主用户存在的信任度为 0.07, $m(H_1)/m(H_0)$ 远小于 1,与实际不符。在 t_5 和 t_6 时刻,4 个 SU 检测结果表明主用户存在的信任度较小,AP 处融合结果为 $m(H_1)$ 为 0.01,判决为主用户不存在。

认真分析会发现,在 t_4 时刻的数据冲突比较大,如表 2 所示。

表 2 节点数据融合时的冲突系数

Table 2 Data conflict coefficient of node - data fusion

时刻	K1	K2	K3
t_1	0.354 8	0.129 0	0.062 5
t_2	0.396 4	0.397 8	0.121 0
t_3	0.352 1	0.233 5	0.898 3
t_4	0.435 6	0.325 8	0.936 9
t_5	0.402 8	0.254 1	0.360 8
t_6	0.296 0	0.098 7	0.382 0

在表 2 中, K_1 表示前两个节点数据融合时的冲突系数, K_2 表示两节点融合结果在与第 3 节点数据进行融合时的冲突系数,依次类推。在 t_1, t_2, t_3, t_5 和 t_6 时刻,所有融合过程中的冲突系数全部小于 0.9,而在 t_4 时刻, $K_3 = 0.936 9$,而“D-S”合并规则并不适合在 $K > 0.9$ 的情况,所以才会出现融合结果的错误。而使用本文改进 D-S 证据理论的多节点协作频谱检测融合算法进行仿真,结果如图 3 所示,融合结果数据在表 1 中。

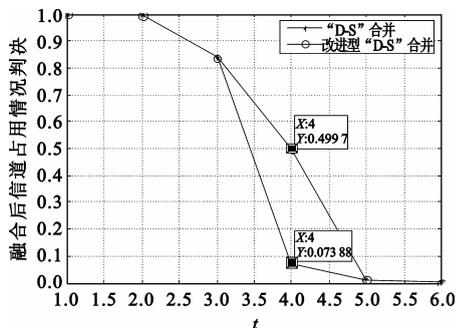


图 3 AP 处主用户存在情况判决

Fig.3 Judgment about the existence of the main user on AP

结合表 2,对图 3 进行分析,在 t_1, t_2, t_3, t_5, t_6 时刻,其冲突系数小于 0.9,改进 D-S 融合算法融合结果与 D-S 融合算法的融合结果相同;在 t_4 时刻,由于 $K_3 = 0.936 9$,大于 0.9,在这样的情况下,改进 D-S 融合算法的融合结果为 $m(H_1) = 0.500$ (统一采用 3 位小数),比未改进的高出了 0.426,使得 $m(H_1)/m(H_0) = 1$,大于门限值,判决结果为主用户存在,判决结果没有因为某个节点受到干扰比较严重而偏离实际。

结合表 1 和图 3 可以看出,来自于频谱感知各节点的数据冲突较小时,本文改进 D-S 证据理论应用于数据融合能够取得和未改进算法同样良好的性能,当数据冲突较大时,性能比未改进的算法有了很大的提高。总的来说,本文改进 D-S 证据理论多节点协作频谱感知算法能够克服节点受环境影响而产生误判的问题,提高了频谱感知的性能。

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia Communications [C]//Proceedings of the Sixth International Workshop on Mobile Multimedia Communications. San Diego, CA:IEEE,1999: 3-10.
- [2] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. Annual Math Statist, 1967, 38(4): 325-339.
- [3] 郑学强,王金龙,陈娟.基于证据理论的协同频谱感知算法[J].解放军理工大学学报,2008,9(6):629-632. ZHENG Xue-qiang, WANG Jin-long, CHEN Juan. Cooperative spectrum sensing algorithms based on evidence theory [J]. Journal of Technology University of PLA, 2008, 9(6): 629-632. (in Chinese)
- [4] 邹琦萍.一种基于信任度的协作频谱感知算法[J].机械与电子,2009(3):110-111. ZOU Qi-ping. Cooperative spectrum sensing algorithms based on trust [J]. Machinery & Electronics, 2009(3): 110-111. (in Chinese)
- [5] 申涛,胡中豫,程放,等.基于证据理论的协同频谱感知算法[J].火力与指挥控制,2010,35(5):10-19. SHENG Tao, HU Zhong-yu, CHENG Fang, et al. Cooperative spectrum sensing algorithms based on evidence theory [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(5): 10-19. (in Chinese)
- [6] Yager R. On the dempster shafer framework and new combination rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(2): 93-137.
- [7] Lefevre E, Colot O, Vannoorenbergh P. Belief function combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [8] 孙全,叶秀清,顾伟康.一种新的基于证据理论的合成公式[J].电子学报,2000,28(8):117-119. SUN Quan, YE Xiu-qing, GU Wei-kang. A new combination rule of evidence theory [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28(8): 117-119. (in Chinese)
- [9] 李弼程,王波,魏俊,等.一种有效的证据理论合成公式[J].数据采集与处理,2002,17(1):33-36. LI Bi-cheng, WANG Bo, WEI Jun, et al. An efficient combination rule of evidence theory [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(1): 33-36. (in Chinese)
- [10] 向阳,史习智.证据理论合成规则的一点修正[J].上海交通大学学报,1999,33(3):357-360. XIANG Yang, SHI Xi-zhi. Modification on combination rules of evidence theory [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(3): 357-360. (in Chinese)
- [11] Murphy C K. Combining belief functions when evidence conflicts [J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1): 1-9.
- [12] 徐凌宇,尹国成,宫义山,等.基于不同置信度的证据组合规则及应用[J].东北大学学报,2002,23(2):123-125. XU Ling-yu, YIN Guo-cheng, GONG Yi-shan, et al. Combination rules of various credibility evidences and application [J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(2): 123-125. (in Chinese)
- [13] 梁昌勇,陈增明,黄永青,等. Dempster-Shafer 合成法则悖论的一种消除方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005(3): 7-12.
- LIANG Chang-yong, CHEN Zeng-ming, HUANG Yong-qing, et al. A method of dispelling the absurdities of dempster-shafer's rule of combination [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005(3): 7-12. (in Chinese)
- [14] 邓勇,施文康,朱振福.一种有效处理冲突证据的组合方法[J].红外与毫米波学报,2004,23(1):27-32. DENG Yong, SHI Wen-kang, ZHU Zhen-fu. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(1): 27-32. (in Chinese)
- [15] 曾元鉴. D-S 证据理论及其改进算法研究 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(10): 48-49. ZENG Yuan-jian. DS evidence theory and its improved algorithm [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(10): 48-49. (in Chinese)

作者简介:

王苗苗(1990—),女,山东菏泽人,2011年于中国矿业大学获学士学位,现为硕士研究生,主要从事无线通信方面的研究;

WANG Miao-miao was born in Heze, Shandong Province, in 1990. She received the B.S. degree from China University of Mining and Technology in 2010. She is now a graduate student. Her research concerns wireless communication.

Email: wmmbest@126.com

李世银(1971—),男,四川犍为人,2008年于中国矿业大学获博士学位,现为教授、博士生导师,主要从事煤矿通信与信息化、无线传感器网络、认知无线电等方面的研究;

LI Shi-yin was born in Qianwei, Sichuan Province, in 1971. He received the Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2008. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns the coal mine communication and information, wireless sensor network and cognitive radio, etc.

Email: lishiyin@cumt.edu.cn

肖淑艳(1987—),女,河南濮阳人,2010年于中国矿业大学获学士学位,现为硕士研究生,主要从事无线通信方面的研究;

XIAO Shu-yan was born in Puyang, Henan Province, in 1987. She received the B.S. degree from China University of Mining and Technology in 2010. She is now a graduate student. Her research concerns wireless communication.

Email: xishyan@163.com

孙科建(1988—),男,浙江诸暨人,2011年于中国矿业大学获学士学位,现为硕士研究生,主要信号与信息处理方面的研究;

SUN Ke-jian was born in Zhuji, Zhejiang Province, in 1988. He received the B.S. degree from China University of Mining and Technology in 2011. He is now a graduate student. His research concerns signal and information processing.

Email: sunkejians@126.com

崔磊(1989—),男,江苏盐城人,2011年于中国矿业大学获学士学位,现为硕士研究生,主要从事无线传感网络方面的研究。

CUI Lei was born in Yancheng, Jiangsu Province, in 1989. He received the B.S. degree from China University of Mining and Technology in 2011. He is now a graduate student. His research concerns wireless sensor networks.

Email: cuilei890207@163.com