

文章编号:1671-251X(2013)08-0042-05

DOI:

肖淑艳,崔洁.基于改进 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法研究[J].工矿自动化,2013,39(8):42-46.

基于改进 D-S 证据理论的认知无线电 频谱感知算法研究

肖淑艳¹, 崔洁²

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 中国人民解放军 91469 部队, 北京 100000)

摘要:针对基于 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法在认知节点的感知信息存在较大冲突时会产生与实际情况相悖结果的问题,提出了一种基于改进 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法。改进算法采用一种新的加权平均方法平均各个证据,比算术平均法更多地降低了异常证据的影响,同时通过计算证据到平均证据的距离来计算证据权值,解决了权值计算复杂度问题。实验结果表明,在认知节点的感知信息存在严重冲突时,改进算法可有效提高认知无线电频谱感知系统的感知性能。

关键词:认知无线电; 频谱感知; D-S 证据理论; 证据冲突; 授权用户; 认知用户

中图分类号:TD655.3

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Research of spectrum sensing algorithm of cognitive radio based on improved D-S evidence theory

XIAO Shu-yan¹, CUI Jie²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China;

2. Troops of 91469 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100000, China)

Abstract: In view of problem that spectrum sensing algorithm of cognitive radio based on D-S evidence theory will due to an inconsistent result when sensing information of cognitive nodes has serious conflict, the paper proposed a spectrum sensing algorithm of cognitive radio based on improved D-S evidence theory. The improved algorithm uses a new weighted average method to average each evidence to further reduce influence of abnormal evidences compared with arithmetic average method. Meanwhile, the improved algorithm calculates weight of evidence through calculating distance from evidence to average evidence, which can solve complexity problem of weight calculation. The experiment result shows that the improved algorithm can effectively improve sensing performance of spectrum sensing system of cognitive radio when sensing information of cognitive nodes has serious conflict.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; D-S evidence theory; evidence conflict; authorized user; cognitive user

收稿日期:2013-05-15。

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

作者简介:肖淑艳(1987—),女,河南濮阳人,博士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知、频谱共享等,E-mail:xishuyan@163.com。

0 引言

频谱感知是认知无线电^[1]的关键技术,单节点频谱感知容易受阴影效应及信道的多径衰落的影响,因此,多用户协作感知受到了极大关注^[2]。D-S 融合^[3]就是其中的一种,但是当融合多节点信息时,主用户的移动、多径效应及外来干扰等会造成某些节点的感知信息不准确,从而造成和其他节点的感知信息存在较大的冲突,这样如果继续采用 D-S 融合规则进行融合就会产生与实际情况相悖的结果。针对证据理论中存在的证据冲突问题,已有的解决方法大致可分为 2 类:对组合规则的改进和对融合模型的改进。Yager 最早提出了 D-S 理论失效的问题,其对合成规则进行了改进,给出了新的合成公式^[4];孙全提出了新的加权形式的合成公式,引入证据间的冲突系数、证据的可信度,这是一种根据证据可信度分配冲突的方法^[5];Murphy 采用平均法对证据进行平均^[6],其实是对融合模型的改进,但是只对证据进行简单的平均,并不能有效解决冲突问题;邓勇对 Murphy 的平均法进行了改进,考虑了证据之间的相互关联程度,通过各个证据间的距离确定证据的可信度,对证据进行加权平均^[7]。该方法确实比别的方法在解决冲突问题上更优越,但在计算权值时,要计算两两证据之间的距离,复杂度较高,其降低冲突的效果是以更高的计算复杂度为代价。为了解决冲突问题,降低计算复杂度^[7-8],本文提出一种改进 D-S 证据理论,并将其应用到认知无线电频谱感知算法中,融合结果表明,改进算法的感知性能明显提高。

1 认知无线电频谱感知系统模型及改进 D-S 证据理论

1.1 系统模型

在存在干扰噪声的前提下,需要识别观测数据中是含有授权用户信号还是纯属干扰噪声,这一类识别问题构成了典型的信号检测问题。认知用户通过检测授权用户频段来判断授权用户是否存在。设 H_0 表示主用户也就是授权用户不存在, H_1 表示主用户存在,这可以抽象为一个二元假设检验问题^[9]:

$$\begin{cases} H_0 & x_i(t) = n_i(t) \\ H_1 & x_i(t) = h_i(t) \otimes s(t) + n_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i(t)$ 为第 i 个认知用户接收到的信号; $n_i(t)$ 为第 i 个认知用户收到的噪声; $h_i(t)$ 为信道增益; $s(t)$ 为主用户发送的信号。

假设一个认知无线电频谱感知系统中有 1 个授权用户 PU,有 n 个认知用户 SU(感知节点)和 1 个融合中心 AP,其模型如图 1 所示。

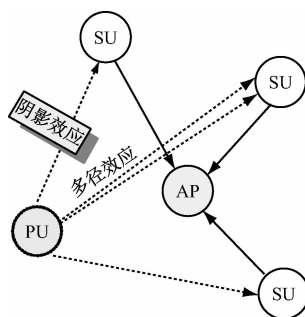


图 1 认知无线电频谱感知系统模型

1.2 改进 D-S 证据理论

1.2.1 基本 D-S 证据理论

D-S 证据理论^[4]使用 Θ 表示一个互斥且完整的假设集,称作识别域,它定义了一个集函数 m , m 是一个从 $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 的函数, m 满足:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (3)$$

式中: $\emptyset$ 代表空集。

对任意的命题 $A \subseteq \Theta$, $m(A)$ 称为 A 的基本信任度分配,也叫证据。由 2 个互相独立的信息推得证据 m_1 和 m_2 ,可以由 D-S 证据理论合成为一个新的证据 $m_1 \oplus m_2$,称作二者的正交和,定义如下:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset \\ \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C)}{1 - K}, & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K = \sum_{B \cap C \neq A} m_1(B)m_2(C)$, 其值反映了各个证据之间的冲突程度。

D-S 证据理论的优势是有目共睹的,但是它仍然存在一些问题,最重要的是合成规则在处理冲突证据时引起的问题:在式(4)中,如果 $K=1$,表示完全冲突,这时就不能使用 D-S 合成规则;而当 $K \rightarrow 1$ 时,对高冲突证据进行处理会产生直接相悖的结果。

1.2.2 改进 D-S 证据理论

改进 D-S 证据理论思路:为了减小“异常”证据的影响,在平均各个证据时,采用一种新的加权平均方法,这样能比简单的平均更多地降低“异常”证据的影响,同时解决计算权值时的计算复杂度问题。改进 D-S 证据理论的权值计算方法如下:

(1) 计算各认知用户感知信息的平均值。

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_n}{n} \quad (5)$$

式中: n 表示认知用户的个数。

(2) 计算各认知用户感知信息到平均感知信息的距离。

$$d_i = |m_i - \bar{m}| = \sqrt{[m_i(H_0) - \bar{m}(H_0)]^2 + [m_i(H_1) - \bar{m}(H_1)]^2} \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 计算各认知用户识别信息的权重。定义认知用户证据的似真度和权重分别为

$$s_i = 1 - d_i \quad (7)$$

$$c_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (8)$$

(4) 求证据的加权平均。

$$m = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n = \sum_{i=1}^n c_i m_i \quad (9)$$

2 基于改进 D-S 证据理论的频谱感知算法研究

在认知无线电频谱感知系统中, 单个认知用户 SU 提供的感知信息往往是对识别授权用户的不完全描述, 利用多个认知用户提供的独立、互补的信息, 进行多认知用户信息融合, 可以消除多个认知用户信息之间可能存在的冗余和矛盾, 降低不确定性, 然而, 由于各种因素如阴影效应、频率选择性衰落、外接干扰等, 多个认知用户提供的信息很有可能是冲突和矛盾的, 而 D-S 证据理论解决不了冲突问题, 所以本文把改进 D-S 证据理论和多认知用户频谱感知信息融合结合起来, 以起到互补作用, 达到更好的识别效果。基于改进 D-S 证据理论的频谱感知算法步骤: ① 认知用户 SU 处的本地感知; ② 中心控制融合点 AP 处的综合决策。

2.1 SU 处的本地感知

在多节点频谱感知情况下, 识别框架 Θ 由 2 个焦元构成: H_0 和 H_1 。由能量感知统计量 x_{Ei} 和参考文献[3], 可得到认知用户 SU 支持 H_0 和 H_1 两种感知结果的信任度的相关性系数为

$$H_0: C_i(x_{Ei} | H_0) = \operatorname{erfc}\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (10)$$

$$H_1: C_i(x_{Ei} | H_1) = \operatorname{erfc}\left[\frac{\lambda - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right] \quad (11)$$

式中: λ 为能量感知的判决门限; σ_w^2, σ_s^2 分别为噪声的方差和认知用户 SU 从授权用户 PU 处接收到信号的方差; N 为采样点数; $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为高斯误差函数。

定义节点 i 本次能量检测的结果对于假设 H_0 和 H_1 两种不同证据的支持程度, 也即基本信度分配函数为

$$m_i(H_0) = 1 - m_i(H_1) \quad (12)$$

$$m_i(H_1) = \sqrt{\frac{C_i(x_{Ei} | H_1)}{C_i(x_{Ei} | H_0) + C_i(x_{Ei} | H_1)}} \quad (13)$$

2.2 AP 处的综合决策

如图 2 所示, 中心融合控制点 AP 接收来自各认知用户 SU 的感知结果 $\{m_i(H_1) m_i(H_0)\}$ 后, 首先通过预处理求平均证据, 然后再根据第 1 节介绍的 D-S 证据融合规则, 得到频谱感知的综合信任度 $\{m(H_1) m(H_0)\}$, 最后根据系统要求, 做出主用户信号存在与否的最终判决。

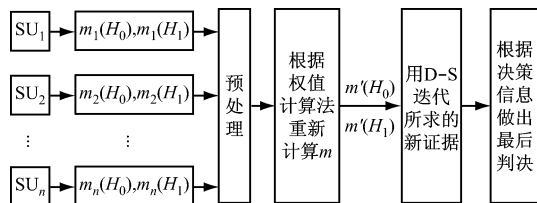


图 2 基于改进 D-S 证据理论的频谱感知算法流程

(1) 各认知用户 SU 在本地进行能量感知, 得到各自的信任度函数 $m_i(H_0), m_i(H_1)$ 。

(2) 各认知用户感知信息即证据的预处理。为了简化计算, 提高效率, 在认知无线电频谱感知系统中, 决策者只关心最终结论是否为识别框架中的单集, 如果证据集合为复集, 就引入贝叶斯近似法进行预处理。

(3) 根据式(5)一式(9)重新计算信任度 m 。

(4) 对 m 用 D-S 方法迭代 $(n-1)$ 次, 得出的结果为

$$M = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \quad (14)$$

改进算法的关键是第 2 步。第 2 步的主要目的是提高合成效率, 基本思想是根据各平均证据的距离计算权重, 遵循距离越大可信度越小的原则。因为距离大, 说明该认知用户的证据离平均距离远, 那么该认知用户与其他证据的冲突就大, 并且对 n 个认知用户只需计算 n 次平均证据, 在解决冲突证据的基础上减少了计算的复杂度, 同时减少了网络开销和延时。

3 实验结果及分析

假设一个认知无线电频谱感知系统中有 4 个认

知用户、1 个授权用户,每个认知用户均采用能量检测,授权用户信号是服从均值为 0、方差为 σ_w^2 的高斯分布随机变量,噪声信号是服从均值为 0、方差为 σ_s^2 的高斯分布随机变量,分别取 5 个时刻: T_1 时刻 4 个信道情况良好, T_2 时刻存在多径衰落(表 1 中加斜体标注,可看出 SU_3 的 $m(H_1)$ 比其他 3 个用户的略小), T_3 和 T_4 时刻均存在阴影效应(表 1 中加下划线标注,可看出 SU_3 的 $m(H_1)$ 与其他 3 个用户的相差很大), T_5 时刻受到干扰信道释放(表 1 中加黑体标注,可看出 SU_2, SU_3, SU_4 的 $m(H_0)$ 均比 $m(H_1)$ 大)。为了叙述方便,下面内容中改进算法用 D-S* 表示。实验结果见表 1、表 2。

表 1 认知用户 5 个时刻的信任度 m					
时刻	信任度 m	SU_1	SU_2	SU_3	SU_4
T_1	$m(H_1)$	0.725	0.635	0.845	0.765
	$m(H_0)$	0.275	0.365	0.155	0.235
T_2	$m(H_1)$	0.675	0.655	0.425	0.565
	$m(H_0)$	0.325	0.345	0.575	0.435
T_3	$m(H_1)$	0.725	0.585	<u>0.125</u>	0.545
	$m(H_0)$	0.275	0.415	<u>0.875</u>	0.455
T_4	$m(H_1)$	0.725	0.585	<u>0.125</u>	<u>0.225</u>
	$m(H_0)$	0.275	0.415	<u>0.875</u>	<u>0.775</u>
T_5	$m(H_1)$	0.725	0.425	0.175	0.205
	$m(H_0)$	0.275	0.575	0.825	0.795

表 2 融合结果对比

时刻	算法	信任度 m	SU_1, SU_2	SU_1, SU_2, SU_3	SU_1, SU_2, SU_3, SU_4	融合结果
T_1	D-S	$m(H_1)$	0.821 0	0.961 5	0.987 9	PU 存在
		$m(H_0)$	0.179 0	0.038 5	0.012 1	
	D-S*	$m(H_1)$	0.848 5	0.939 2	0.978 1	PU 存在
		$m(H_0)$	0.151 5	0.060 8	0.021 9	
T_2	D-S	$m(H_1)$	0.797 7	0.744 5	0.791 0	PU 存在
		$m(H_0)$	0.202 3	0.255 5	0.209 0	
	D-S*	$m(H_1)$	0.804 8	0.856 8	0.893 6	PU 存在
		$m(H_0)$	0.195 2	0.143 2	0.106 4	
T_3	D-S	$m(H_1)$	0.788 0	0.346 8	0.388 7	PU 不存在
		$m(H_0)$	0.212 0	0.653 2	0.611 3	
	D-S*	$m(H_1)$	0.833 5	0.841 9	0.857 3	PU 存在
		$m(H_0)$	0.166 5	0.158 1	0.142 7	

时刻	算法	信任度 m	SU_1, SU_2	SU_1, SU_2, SU_3	SU_1, SU_2, SU_3, SU_4	融合结果
T_1	D-S	$m(H_1)$	0.788 0	0.346 8	0.133 5	PU 不存在
		$m(H_0)$	0.212 0	0.653 2	0.866 5	
	D-S*	$m(H_1)$	0.833 5	0.841 9	0.788 9	PU 存在
		$m(H_0)$	0.166 5	0.158 1	0.211 1	
T_5	D-S	$m(H_1)$	0.273 6	0.074 0	0.020 2	PU 不存在
		$m(H_0)$	0.726 4	0.926 0	0.979 8	
	D-S*	$m(H_1)$	0.660 9	0.441 3	0.209 1	PU 不存在
		$m(H_0)$	0.339 1	0.558 7	0.790 9	

T_1 时刻,4 个 SU 的证据不冲突,用 D-S 和 D-S* 均能得到正确的融合结果,此时 PU 存在,信道被占用。

T_2 时刻, SU_3 受多径衰落影响,但是此时的证据冲突不高,用 D-S 和 D-S* 均能得到正确的融合结果,D-S 的融合结果为 0.791 0,D-S* 的融合结果为 0.893 6,D-S* 比 D-S 的精度要高。

T_3 时刻, SU_3 可能受阴影效应的影响,此时的证据严重冲突,D-S 融合结果为 0.388 7,出现错误判决,而 D-S* 采用加权组合得到正确的结果 0.857 3,此时 PU 存在,信道被占用。

T_4 时刻, SU_3 和 SU_4 均受阴影效应的影响,此时的证据冲突比 T_3 时刻更严重,但是用 D-S* 对各个证据进行加权平均后也得到了正确的融合结果。

T_5 时刻, SU_2 受到干扰的影响,PU 不存在,信道被释放,D-S 和 D-S* 均能得到正确的融合结果。

实验结果表明,在各个 SU 证据严重冲突时,采用 D-S* 能明显提高认知无线电频谱感知系统的感知率,感知性能有了较大提高。

4 结语

基于多用户协作数据融合思想,结合改进 D-S 证据理论,提出了一种基于改进 D-S 证据理论的认知无线电频谱感知算法,解决了认知用户 SU 存在证据冲突的问题,实验结果验证了该算法的可行性和有效性。改进算法的权重分配过于理想,如何根据实际情况分配权重是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] MITOLA J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [C]//Sixth International Workshop on Mobile Multimedia Communications, San Diego, CA, 1999.
- [2] 梁红玉, 陈宏滨, 赵峰. 认知无线电协作频谱感知技术综述[J]. 广西通信技术, 2011(2): 42-48.
- [3] 郑学强, 王金龙, 吴启晖, 等. 基于 Dempster-Shafer 证据理论的协同频谱感知算法[J]. 信号处理, 2009, 25(10): 42-46.
- [4] YAGER R. On the dempster-shafer framework and new combination rules [J]. IEEE Transactions on System, 1987, 41(2): 93-137.
- [5] 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): 118-120.
- [6] 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): 29-34.
- [7] 韩峰, 杨万海, 袁晓光. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 电光与控制, 2010, 17(4): 9-12.
- [8] 张航, 王一军, 罗大庸. 改进的 D-S 证据理论及在水质评价中的应用[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(6): 214-217.
- [9] LI Jiajun, TAN Zhenhui, AI Bo, *et al.* Weighted hard combination for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. China Communications, 2011(2): 111-117.