

基于 DS 证据理论的双门限协作频谱感知新方法

孙 飞,胡 钧

(南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室,江苏 南京 210003)

摘 要:文中提出了一种认知无线电协作频谱感知改进方法。该方法将基于 DS 证据理论的融合技术与双门限判决方法的优点结合起来。首先,在本地感知时,根据双门限判决去除可靠性不高的感知用户,让可靠性较高的感知用户向融合中心发送信任度函数值,减少了向融合中心发送的数据,从而降低了系统的协作带宽开销。在融合中心,利用 DS 融合准则,只对接收到的可靠性较高的数据进行融合判决,从而降低融合中心的计算量。仿真结果表明,该改进方法在降低系统的计算量的同时,既可以保持经典 DS 证据融合方法的高检测性能,也可以有效地降低协作感知的报告信道带宽。

关键词:协作频谱感知;DS 证据理论;双门限判决;协作带宽开销

中图分类号:TN925.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)04-0195-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.04.043

Improved Cooperative Spectrum Sensing Scheme of Double Threshold Decision Based on Dempster-Shafer Theory

SUN Fei, HU Jun

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: An improved cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio networks is proposed, which combines the fusion technology based on Dempster-Shafer evidence theory with the advantage of double threshold decision. In the local sensing period, double threshold decision is introduced to remove the cognitive users with low reliability and let the cognitive users with high reliability send the trusted function value, decreasing the data sending to the fusion center, so as to reduce report channel bandwidth of cooperation. In the fusion period, just the highly credible sensing results are fused at the fusion center using the Dempster-Shafer theory, which could reduce the calculation of fusion center. The simulation results show that the novel scheme can keep high detection performance and reduce bandwidth of cooperation with a low calculation of cooperative system.

Key words: cooperative spectrum sensing; Dempster-Shafer evidence theory; double threshold decision; bandwidth cost of cooperation

1 概 述

近年来,随着无线通信技术的快速发展,如 Wifi、蓝牙、3G、4G 等等,越来越多的通信系统需要使用无线频谱资源,使得原本就很稀缺的无线频谱资源问题变得更加严峻。尤其是最适合无线通信的 3 GHz 以下的频段已经所剩无几了,这已经成为制约无线通信技术发展的一大瓶颈。然而,与此同时,已授权频谱的使用效率却比较低^[1],只有 15% 到 85%。认知无线电^[2](Cognitive Radio, CR)可以弥补现有频谱分配机制的缺陷,有效地提高频谱利用率,从而大大缓解频谱

资源短缺的问题。认知无线电的主要思想是,具有认知能力的次级用户(Secundary User, SU)对授权主用户(Licensed User, LU)信号进行感知,在不影响 LU 通信的前提下,可以使用分配给 LU 的频谱进行数据传输。频谱感知作为认知无线电的关键技术之一,已受到人们广泛的关注^[3-5]。

在真实的通信环境中,因为无线信道存在阴影效应、深衰落等问题,单个 SU 的频谱感知性能往往不理想。为了提高频谱感知系统的性能,现在普遍采用协作频谱感知技术。它利用处理不同地理位置的多个 SU 共同检测频谱信息,再将这些感知信息进行融合,

收稿日期:2015-05-15

修回日期:2015-08-19

网络出版时间:2016-03-22

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2009AA01Z241);国家自然科学基金资助项目(61271335,61201161);江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA510003)

作者简介:孙 飞(1990-),男,硕士研究生,研究方向为认知无线电和无线传感网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160322.1518.032.html>

得到最终的判决结果。协作频谱感知可以大大提高感知性能,但也会产生额外的协作开销,比如更多的能量消耗、融合时间、报告带宽等等。

协作频谱感知包括两个部分:一是每个 SU 独立完成本地频谱感知。常用的方法有匹配滤波器检测、能量检测、循环平稳特性检测,各 SU 对感知到的数据加以初步处理,然后发送到融合中心(Fusion Center, FC);二是 FC 通过融合准则对接收到的感知结果进行融合判决。常用的融合准则有数据融合(如等增益合并、最大比值合并)和硬判决融合(如与准则、或准则、表决融合准则)。

更好性能的融合准则和更小的协作开销是协作频谱感知追求的目标,也是热点研究问题。近年来,DS 证据理论在协作频谱感知中的应用引起了广泛的关注和研究。它可以在先验概率未知的情况下解决不确定问题,并能得到很好的融合结果。

文献[6]率先将 DS 证据理论应用在协作频谱感知中,联合所有 SU 带有自身置信度的本地感知结果,无需 LU 的先验知识,FC 使用 Dempster 合成规则融合数据得到最终的判决结果,大大提高了检测性能。但是文献[6]没有考虑各 SU 感知信道的不同。文献[7]在此基础上,采用更合适的 BPA(Basic Probability Assignment)作为 SU 的信任度函数,同时利用 SU 信噪比的大小作为权重来修正 BPA,从而提高了检测性能。然而,文献[6]和文献[7]一样,都没有考虑 DS 证据融合方法需要较大的报告信道带宽。为了减小报告信道带宽,文献[8]提出利用不同信噪比下假设分布的特殊属性有效量化数据,文献[9]引入投影近似法来减少 SU 上报给 FC 的感知数据。两种方法都实现了降低报告带宽的开销,但这两种方法都会增加 SU 的计算复杂度,不仅增加判决时间,还增加能耗。而 SU 一般是移动终端,能量有限,不宜进行复杂计算。

针对以上问题,文中提出了一种基于 DS 证据理论的协作频谱感知改进方法,既降低了报告信道带宽,也减小了系统的计算量。

2 系统模型

图 1 是文中的系统模型。

它是最常用的协作频谱感知模型。假设系统中只有一个授权主用户(LU)、多个非授权的次用户(SU)和一个进行最终判决的融合中心(FC)。各个 SU 同时对 LU 发射的信号进行感知,它们之间的信道是无线衰落信道。SU 在本地进行初步的信息处理以后,将处理后的信息发送给 FC,由 FC 进行最后的判决。因为文中主要研究的是协作融合算法,故假设 SU 和 FU 之间的信道是理想信道,不考虑它们之间的传输过程。

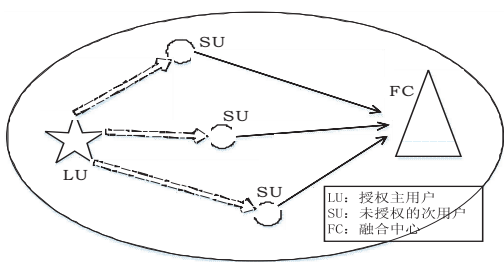


图 1 协作频谱感知系统模型

2.1 二元假设检测模型

在本地感知时,每一个 SU 都同时对 LU 的信号进行感知。采用传统的二元假设检验模型来表示接收到的信号:

$$x(t) = \begin{cases} n(t), H_0 \\ h(t)s(t) + n(t), H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: H_0 表示 LU 信号不存在; H_1 表示 LU 信号存在; $x(t)$ 表示 SU 接收到的信号; $n(t)$ 表示加性高斯白噪声; $h(t)$ 表示 LU 和 SU 之间的信道增益; $s(t)$ 表示 LU 存在时发射的信号。

2.2 本地频谱感知

在 SU 处,文中采用最常用的能量检测法。使用带通滤波器来处理感知的信号,得到很多个采样值,通过这些采样值计算出信号的能量。第 i 个 SU 的本地检测统计量如下:

$$x_{E_i} = \sum_{j=1}^N |x_{i,j}|^2 \quad (2)$$

其中: $x_{i,j}$ 表示第 i 个 SU 接收信号的第 j 个采样值; $N = 2TW$ 表示采样点的个数, T 表示 SU 一次检测的时间, W 表示信号的带宽,单位是 Hz。

当 N 相当大时,比如 $N > 250$,在 H_0 和 H_1 情况下, x_{E_i} 都可以近似认为是高斯随机变量,相应的均值 μ_0 , μ_1 和方差 σ_0^2, σ_1^2 分别为:

$$\begin{cases} \mu_{0i} = N, \sigma_{0i}^2 = 2N \\ \mu_{1i} = N(\gamma_i + 1), \sigma_{1i}^2 = 2N(2\gamma_i + 1) \end{cases} \quad (3)$$

其中, γ_i 表示第 i 个 SU 的信噪比。

3 DS 证据理论

DS 证据理论由 Dempster 首先提出,后来由 Shafer 加以补充,才发展成一门经典的理论,尤其在处理不确定信息时,效果非常好。如今,DS 证据理论已经应用在许多领域,比如智能研究、目标识别等等。

本节接下来的内容,将简单介绍 DS 证据理论,更详细更完整的介绍请参考文献[10]。

3.1 DS 证据理论的基本概念

假设 Θ 是证据理论的鉴别框架(Frame of Discernment),它包括有限个基本假设,并且每个假设都是互斥的。

如果集合函数 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 满足式(4),那么称 m 是鉴别框架 Θ 上的 BPA 函数。

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Φ 表示空集; $m(A)$ 表示 A 假设的基本可信度或者基本概率赋值函数。

定义信任函数 $\text{Bel}(A)$ 。对于任意 $A \subset \Theta$,有:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (5)$$

其中, $\text{Bel}(A)$ 表示 A 中所有子集的基本可信度总和,表示给予假设 A 的全部支持程度,包括对 A 的子集的支持。

3.2 DS 证据理论的组合规则

设 m_1 和 m_2 分别是同一鉴别框架 Θ 上的两种基本赋值函数,焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_r , 那么:

$$m(C) = m_1(A_i) \oplus m_2(B_j) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)} \quad (6)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r, K =$

$(1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j))^{-1}$ 表示归一化因子。

按照上述规则,可以将多条独立证据组合起来,而且多个证据的组合具有可交换性和可结合性。

4 基于 DS 证据理论的协作频谱感知

因为无线信道的随机性,每个 SU 检测到的结果不一定准确。DS 证据理论不仅能解决检测不确定的问题,而且利用 DS 证据理论的组合规则,可以综合不同 SU 的数据,因此被引入到协作频谱感知中来^[11-15]。

假设 Θ 是 DS 证据理论的鉴别框架,对于频谱感知来说, $\Theta = \{H_1, H_0, \Omega\}$ 。其中, Ω 表示不能确定 H_1 和 H_0 的真假。根据文献[7],第 i 个 SU 对 H_1 、 H_0 和 Ω 的 BPA 分别为:

$$m_i(H_0) = \int_{x_{E_i}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0i}} e^{-\frac{(x-\mu_{0i})^2}{\sigma_{0i}^2}} dx \quad (7)$$

$$m_i(H_1) = \int_{-\infty}^{x_{E_i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1i}} e^{-\frac{(x-\mu_{1i})^2}{\sigma_{1i}^2}} dx \quad (8)$$

$$m_i(\Omega) = 1 - m_i(H_0) - m_i(H_1) \quad (9)$$

对于上面三个值,只需要将其中的任意两个发送到融合中心即可。

在 FC,利用 DS 证据理论的组合规则得到总的 BPA,计算公式为:

$$m(H_0) = \frac{1}{1-K} \cdot \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_0} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (10)$$

$$m(H_1) = \frac{1}{1-K} \cdot \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_1} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (11)$$

其中, $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i), A_1, A_2, \dots, A_n \in \{H_0, H_1, \Omega\}$ 。

最终的判决策略如下:

$$\begin{cases} H_1: m(H_1) > m(H_0) \\ H_0: m(H_1) < m(H_0) \end{cases} \quad (12)$$

5 DS 证据融合算法的改进方法

实验证明,DS 证据融合算法能够有效地提高频谱感知系统的可靠性^[6-7]。然而 DS 证据融合算法需要较大的报告信道带宽来传输感知结果,这会影晌系统的性能。针对此问题,文献[9]引入投影近似法来减小 SU 上报给 FC 的感知数据,有效地减小了报告信道带宽。但是文献[9]需要在 SU 处做复杂计算,而 SU 一般是移动终端,能量有限,不宜进行复杂计算。

针对此问题,文中提出了一种改进方法。其主要思想是:在本地感知时,引入双门限判决的方法,找出可靠性较差的 SU,不让它们向 FC 发送信任度数据,这样就可以减少 SU 向 FC 发送的总数据量,从而有效降低了报告信道带宽;在数据融合过程中,FC 只利用这些可靠性较大的数据进行融合判决,可以减小 FC 的计算量。同时,因为双门限判决并不需要 SU 进行复杂计算,从而有效地降低了 SU 的计算量。

5.1 基于双门限的 DS 证据融合方法

因为无线信道的不确定性,本地感知时接收到的信号可能很不准确,根据式(7)和式(8)计算出来的信任度可能存在错误,这样的数据如果参加 FC 的融合判决,不仅对系统的检测性能没有提升,甚至可能对判决结果造成偏差。双门限判决可以大大降低误检概率,常用于本地能量检测^[16-17]。设 η_{0i} 和 η_{1i} 是第 i 个 SU 能量判决的两个门限($\eta_{1i} > \eta_{0i}$), x_{E_i} 表示第 i 个 SU 感知到的能量。

当 $\eta_{0i} \leq x_{E_i} \leq \eta_{1i}$,此时判决结果存在很大的不确定性,如果让这样的数据参与最终的融合判决,很容易发生错误,降低了系统的性能,也浪费了传输带宽。

当 $x_{E_i} > \eta_{1i}$ 或 $x_{E_i} < \eta_{0i}$,此时判决结果较为准确,用这部分数据进行融合判决,可得到较好检测性能。

基本方法如下:

$$\begin{cases} x_{E_i} > \eta_{1i} \text{ 或者 } x_{E_i} < \eta_{0i}, \text{向 FC 发送数据} \\ \eta_{0i} < x_{E_i} < \eta_{1i}, \text{不向 FC 发送数据} \end{cases} \quad (13)$$

5.2 求两个门限值 η_{0i} 、 η_{1i}

为了能够在达到高的检测性能的同时,有效地减小协作带宽开销,需要设定适合的门限值。图2是本地频谱感知时信任度函数和检测能量之间的关系。其

中,采样数 $N = 300$,信噪比 $\gamma = -14$ dB。

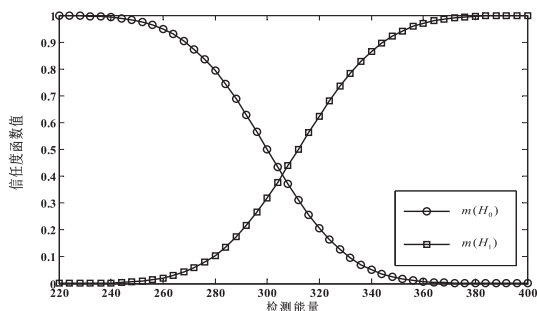


图 2 检测能量与信任度函数之间的关系

从图 2 中可以发现,随着检测到的能量 x_{E_i} 的增大, $m_i(H_1)$ 在增大,而 $m_i(H_0)$ 在减小,这完全符合实际情况。同时可以发现,在 $x_{E_i} = 310$ 左右时,此时 $m_i(H_1)$ 和 $m_i(H_0)$ 相差不大,即此时无法准确判断 LU 是否存在。这样的数据对 FC 处的融合判决作用不大,甚至可能造成错误,所以通过设定门限,让这一区域的数据不发送给 FC,既可以保持高的检测性能,也可以减小报告信道带宽。

定义 η_{0i} 和 η_{1i} 满足:

$$\begin{cases} \frac{m_i(H_0)}{m_i(H_1)} = \alpha, \text{ 当 } x_{E_i} = \eta_{0i} \\ \frac{m_i(H_1)}{m_i(H_0)} = \alpha, \text{ 当 } x_{E_i} = \eta_{1i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{1 - Q(\frac{\eta_{0i} - \mu_{0i}}{\sigma_{0i}})}{Q(\frac{\eta_{0i} - \mu_{1i}}{\sigma_{1i}})} = \alpha \\ \frac{1 - Q(\frac{\eta_{1i} - \mu_{1i}}{\sigma_{1i}})}{Q(\frac{\eta_{1i} - \mu_{0i}}{\sigma_{0i}})} = \alpha \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\alpha \geq 1$ 称为门限因子,表示两个信任度函数之间的倍数关系。当 $\alpha = 1$ 时, $\eta_{0i} = \eta_{1i}$, 这时双门限法 DS 证据融合方法与经典的 DS 证据融合是等同的。

当给定门限因子 α , 根据式 (3) 和式 (14) 就可以求出 η_{0i} 和 η_{1i} 。并且可以通过调节 α 的大小来调整 η_{0i} 和 η_{1i} 的大小,使得系统性能在保持很好的情况下,尽可能地减小传输数据的 SU 个数,从而尽可能地减小了报告信道带宽。

6 仿真结果

针对文中的协作频谱感知系统,假设 LU 发出的是 BPSK 信号,LU 信号存在与否的先验概率相同,都是 0.5;系统中有 10 个 SU,信噪比分别为 -10 dB, -11 dB, -12 dB, -13 dB, -14 dB, -15 dB, -16 dB, -17 dB, -18 dB, -19 dB;能量检测的采样数为 300。使用 Monte Carlo 方法评估算法的性能,仿真次数为 100 000 次。

6.1 双门限 DS 证据融合方法与其他融合算法的性能比较

在图 3 中,分别做出“与”融合、“或”融合、文献 [9] 改进方法以及文中提出的双门限 DS 证据融合方

法的 ROC 曲线图。其中双门限 DS 证据融合方法的门限因子取 $\alpha = 5$ 。

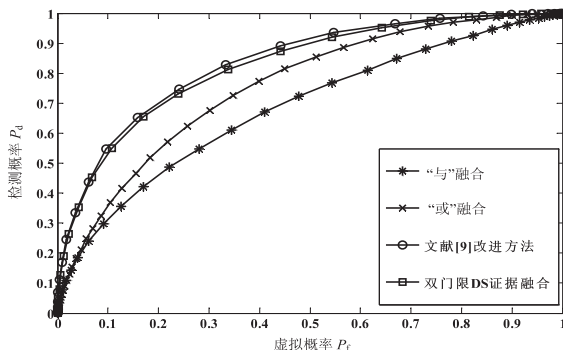


图 3 不同融合算法的性能比较

从图中可以发现,文中提出的双门限 DS 证据融合方法的检测性能非常接近文献 [9] 改进方法,都明显好于“与”融合和“或”融合算法。这说明了该改进算法保持了经典 DS 证据融合的高检测性能的优点,具有很高的实用性。

6.2 不同门限因子的双门限 DS 证据融合方法的性能变化

图 4 为不同门限因子 α 的双门限 DS 证据融合方法的 ROC 曲线图。

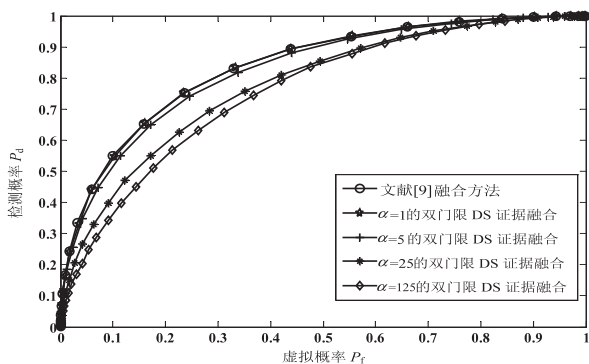


图 4 不同门限因子 α 的双门限 DS 证据融合方法的性能比较

从图中可以发现,随着门限因子 α 的增大,双门限 DS 融合方法的检测性能会缓缓降低;当 $\alpha \leq 5$ 时,双门限法 DS 证据融合方法与文献 [9] 改进方法的性能很接近,依然保持了经典 DS 证据融合的高检测性能的优点。

6.3 双门限 DS 证据融合方法对协作带宽开销影响

图 5 仿真了双门限 DS 证据融合方法取不同门限因子 α 时,向 FC 发送数据的 SU 个数。

从图 5 中可以发现,随着门限因子 α 的增大,向 FC 发送数据的 SU 个数在快速减少,所需要的系统报告带宽也就减小了。其中,当 $\alpha = 5$ 时,只有 4 个 SU 要向 FC 发送数据,占 SU 总数的 40%,所以系统的协作带宽开销减小了一半以上。

为了更直观地看出双门限法 DS 证据融合方法对

于系统性能的改善,对协作频谱感知系统中存在不同SU的性能变化进行仿真,见表1。其中,门限因子取 $\alpha=5$,蒙特卡洛仿真次数为1 000 000。

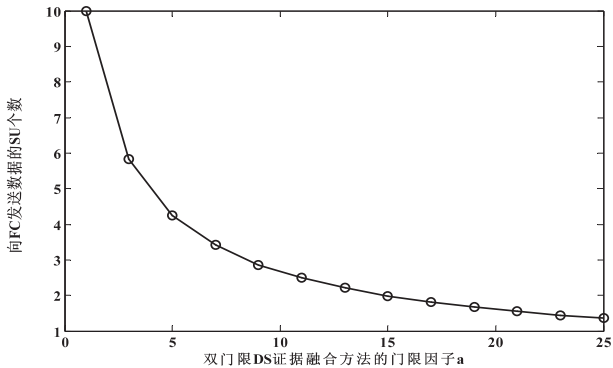


图5 双门限法DS证据融合方法中发送数据的SU个数

表1 双门限法DS证据融合方法的检测性能与带宽开销的变化

SU 个数	向 FC 发送数据的SU 个数	相比经典 DS 证据融合方法,协作带宽开销减小百分比/%	相比文献[9]改进方法,协作带宽开销减小百分比/%
5	2.07	58.5	17
10	4.26	57.4	14.8
15	6.60	56.0	12
20	8.39	58.0	16
25	11.26	54.9	9

从表1可发现,当门限因子取 $\alpha=5$ 时,系统的协作带宽开销,相比经典的DS证据融合方法减小了50%以上,相比文献[9]改进方法也减小了10%左右。

综上所述,当门限因子 $\alpha=5$ 时,相比文献[9]改进方法,双门限DS证据融合方法的检测性能略有下降,但依然保持了经典DS证据融合方法的高检测性能,同时,双门限DS证据融合方法的协作带宽比文献[9]减小了10%左右。

最重要的是,双门限DS证据融合方法既减小了SU的计算量,又因为参与融合判决的SU个数减小了一半,FC的计算量也减小了一半左右。

7 结束语

文中提出了一种基于DS证据理论的双门限协作频谱感知改进方法。针对现有方法为了减小协作带宽,需要增加SU计算量的问题,文中在本地感知时加入了双门限判决,去除可靠性较低的SU,减少发送到FC的总数数据量,从而既减小所需的报告信道带宽,也没有增加SU的计算量。同时,因为参与FC融合判决的SU个数减小了,FC的计算量也减小了。仿真结果表明,只要选择合适的门限因子,确定合适的门限值,双门限DS融合方法的性能和现有的DS证据融合方法非常接近,都能保持非常好的检测性能,同时还可以有效地减小协作带宽开销和系统的计算量。

参考文献:

[1] First report and order[R]. [s. l.]: Federal Communication Commission Std., 2002.

[2] Haykin S. Cognitive radio; brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.

[3] Ganesan G, Li Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proc of First IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access networks. [s. l.]: IEEE, 2005: 137-143.

[4] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks; requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39.

[5] Quan Z, Cui S, Sayed A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 28-40.

[6] Png Q H, Zeng K, Li S Q, et al. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context[C]//Proc of the 17th annual IEEE international symposium on personal, indoor and mobile radio communications. Helsinki, Finland: IEEE, 2006: 1-5.

[7] Nguyen-Thanh N, Koo I. An enhanced cooperative spectrum sensing scheme based on evidence theory and reliability source evaluation in cognitive radio context[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(7): 492-494.

[8] Nguyen-Thanh N, Koo I. Evidence-theory-based cooperative spectrum sensing with efficient quantization method in cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 185-195.

[9] 于美婷,赵林靖,李 钊. 基于DS证据理论的协作频谱感知改进方法[J]. 通信学报, 2014, 35(3): 168-173.

[10] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1976.

[11] 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): 1532-1536.

[12] 郝博雅,周 辉,孙 斌. 基于权值的合作频谱感知算法[C]//第六届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 出版地不详: 出版者不详, 2012.

[13] 张俊楠,张绍武. 基于证据折扣优化DSmT的协同频谱感知器[J]. 信号处理, 2012, 28(2): 166-171.

[14] 王 力,白 静,张怡然. 一种新的DS证据理论冲突处理方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8497-8501.

[15] 韩 勇,王 放,陈 强,等. 一种信任度模糊分配的合作频谱感知算法[J]. 信号处理, 2011, 27(6): 939-944.

[16] Sun C, Zhang W, Letaief K. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints[C]//Proc of wireless communications and networking conference. [s. l.]: IEEE, 2007: 1-5.

[17] 张 亮,冯景瑜,卢光跃. 协作频谱感知中的可信双门限硬判决融合算法[J]. 信号处理, 2014, 30(2): 181-188.