

基于 DS 证据理论的协作频谱感知改进方法

于美婷, 赵林靖, 李钊

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 提出了一种新的协作频谱感知方法, 该方法采用 DS 证据理论。首先, 在本地感知通过投影近似法分解感知结果以减少次级用户上报至融合中心的感知数据, 从而降低协作带宽开销。其次, 在融合中心根据次级用户证据矢量之间的距离计算可信度, 以可信度为权重对每个次级用户的基本概率分配进行加权平均来减小高度冲突数据对检测性能的影响。仿真结果表明, 该方法减少了协作感知的带宽开销, 改善了数据高度冲突时的检测性能。

关键词: 协作频谱感知; 数据融合; DS 证据理论; 证据高度冲突

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0168-06

Improved cooperative spectrum sensing scheme based on dempster-shafer theory in cognitive radio network

YU Mei-ting, ZHAO Lin-jing, LI Zhao

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An improved cooperative spectrum sensing scheme based on dempster-shafer evidence theory in cognitive radio networks was proposed. In the local sensing period, the projection approximation algorithm was introduced to reduce bandwidth for cooperation. In the fusion period, credibility was calculated by the distance between evidence vectors of different secondary users and adopted as the weights to combine different local sensing data. The new scheme reduces channel bandwidth and simulation results show that the new scheme improves the performance under the condition of high level conflict.

Key words: cooperative spectrum sensing; data fusion; dempster-shafer theory of evidence; high level conflict

1 引言

近年来, 随着无线通信的快速增长和无线服务需求的急剧增加, 无线频谱资源变得越来越稀缺, 而现有的频谱分配机制使得频谱资源利用率低。认知无线电^[1](CR, cognitive radio)可以有效地提高频谱利用率, 同时解决频谱资源短缺的问题。CR 技术的基本思想是: 具有认知能力的次级用户 (SU, secondary user) 实时感知无线通信环境中频谱使用情况, 并识别可利用的频谱空洞, 在不干扰授权用户 (LU,

licensed user) 的前提下与其共享频谱。因此, 频谱感知也就成为 CR 的关键技术^[2]。在实际通信环境中, 单个 SU 的频谱感知性能会受到阴影效应、深衰落和接收机不确定性等^[3]很多因素的限制。为克服单个用户感知的缺点, 提高感知可靠性, 可以利用处于不同地理位置的 SU 共享频谱感知信息, 获得空间分集增益。因此, 协作频谱感知^[4-6]被提出。协作频谱感知在带来协作增益的同时还会产生协作开销, 相对于单个 SU 感知, 协作感知需要额外的协作感知设备、能量消耗、感知时间以及报告带宽等。

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231008, 60902032); 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03003005-005); 高校科研基本业务费基金资助项目(K50511010008); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 高等学校创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61231008, 60902032); National S&T Major Project (2012ZX03003005-005); Fundamental Research Funds for the Central Universities(K50511010008); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT0852); The 111 Project(B08038)

协作频谱感知主要分为 2 个阶段：1)感知阶段，每个 SU 独立完成本地频谱感知，并将本地感知结果经过报告信道发送到融合中心(FC, fusion center); 2) 融合阶段，FC 处理接收到的感知结果，进而对 LU 信号是否存在做出最终判决。常见的融合准则有数据融合(如等增益合并、最大比值合并及选择式合并)和硬决策融合(如与准则、或准则、大多数准则)^[7]。

协作开销和融合判决是协作频谱感知研究的 2 个热点问题。DS 证据理论能够在先验概率未知的情况下解决不确定性问题，得到较好的融合结果，因此，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研究和关注。文献[8]提出了一种优于硬决策融合的软决策融合方法，联合所有 SU 带有自身估计置信度的本地感知结果，无需 LU 的先验知识，使用 Dempster 合成规则融合检测数据得到最终判决结果，有效地提升了检测性能。但是，文献[8]中没有考虑感知信道条件的不同。针对此问题，在文献[8]的基础上，文献[9]利用信噪比估计每个 SU 的可靠性，修改了基本概率分配(BPA, basic probability assignment)函数，从而提高了检测性能。然而，上述 2 种方法都需要宽带报告信道来传输感知结果。为了减小报告带宽开销，文献[10]提出了一种有效量化的协作感知方案，该方案利用 LU 信号在不同信噪比下假设分布的特殊属性有效量化感知数据，减小报告信道所需带宽。然而，由于实际的无线环境中存在强干扰、深衰落以及恶意攻击等，一些 SU 会把错误的感知结果发给 FC，这种错

误的数据在证据理论中称为高度冲突数据，它会使 FC 在使用 Dempster 合成规则融合数据和最终判决时产生错误，从而降低检测性能。

针对高冲突数据影响检测性能的问题，本文提出了一种新的协作频谱感知方法，该方法采用 DS 证据理论。在本地感知过程中，引入投影近似法来减少 SU 上报给 FC 的感知数据，以降低报告带宽开销；在数据融合过程中，FC 利用可信度作为权重对各 SU 的基本概率分配进行加权平均，来减小高度冲突数据对检测性能的影响。

2 系统模型

图 1 给出了协频谱作感知的系统模型，假设系统中有一对授权用户收发射机(分别用 LU Rx 和 LU Tx 表示)、 n 个次级用户 SU 和一个融合中心 FC，SU 接收 LU 信号的感知信道为无线衰落信道，SU 发送感知数据到 FC 的报告信道是理想信道。其中， SU_2 是故障用户，会发送高度冲突数据。

2.1 二元假设检验模型

本地感知时，每个 SU 采用传统的二元假设检验模型为

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

其中，假设 H_0 和 H_1 分别表示 LU 信号不存在和存在。 $s(t)$ 表示 LU 的发射信号， $x(t)$ 表示 SU 接收到的信号， $h(t)$ 表示 LU 到 SU 之间的信道衰落， $n(t)$ 表示加性高斯白噪声。

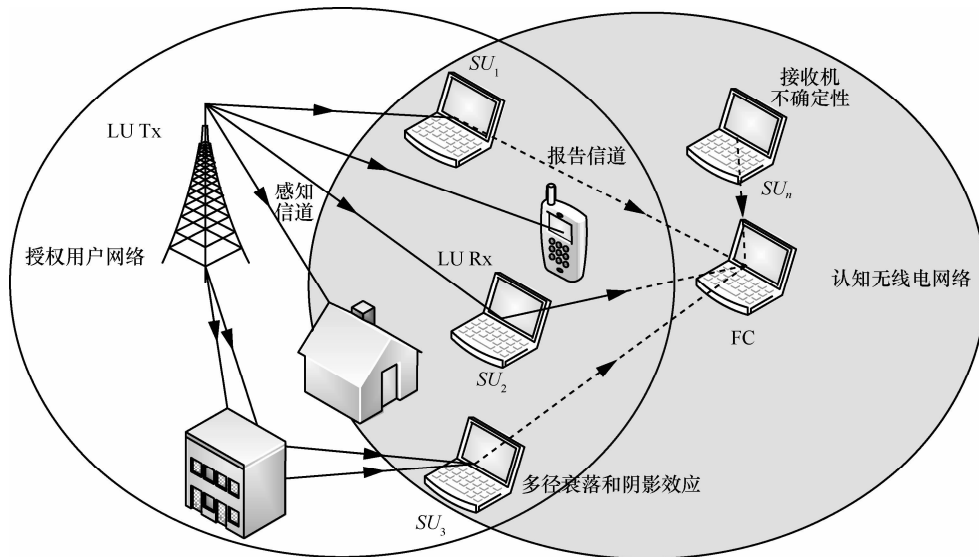


图 1 协作频谱感知系统模型

2.2 本地频谱感知

本地感知时, 每个 SU 使用能量检测算法, 那么第 i 个 SU 的本地检测统计量为

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

其中, $x_{i,j}$ 表示第 i 个 SU 接收信号的第 j 个采样值, N 表示采样值个数, 并且 $N=2TW$, T 表示检测时间, W 表示信号带宽。当 N 足够大时, 例如: 大于 200, x_{E_i} 近似服从高斯分布, 在假设 H_0 和 H_1 下 x_{E_i} 的均值和方差分别为

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

其中, γ_i 是信噪比。

3 已有基于 DS 证据理论的协作频谱感知方法

由于无线信道的不稳定性, 每个 SU 可能无法正确判断 LU 信号是否存在, 从而导致了检测的不确定性, 而 DS 证据理论可以有效地解决这种不确定, 再加上 Dempster 合成公式可以综合不同数据源的知识或数据, 因此被应用到协作频谱感知中^[8-10]。

根据 DS 证据理论, 定义识别框架 $\{H_1, H_0, \Omega\}$, 其中, Ω 代表 H_1 和 H_0 中任一假设为真。根据文献 [9], 第 i 个 SU 对 2 个假设 H_1 和 H_0 及 Ω 的 BPA 分别为

$$\begin{aligned} m_i(H_1) &= \int_{-\infty}^{x_{E_i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{1i}^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{1i})^2}{\sigma_{1i}^2}\right) dx \\ m_i(H_0) &= \int_{x_{E_i}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{0i}^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{0i})^2}{\sigma_{0i}^2}\right) dx \\ m_i(\Omega) &= 1 - m_i(H_1) - m_i(H_0) \end{aligned} \quad (4)$$

此时, 至少需要发送 $\{m_i(H_1), m_i(H_0), m_i(\Omega)\}$ 中的 2 个到 FC, 需要较大的报告信道带宽。

根据 Dempster 合成规则, FC 对来自所有 SU 的 BPA 进行融合得到总的 BPA, 为

$$\begin{aligned} m(H_1) &= \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_1} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \\ m(H_0) &= \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_0} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$, $A_1, A_2, \dots, A_n \in \{H_0, H_1, \Omega\}$ 。如果有 SU 发送高度冲突数据, 会影响合成式(5)的结果。

通过比较 $m(H_1)$ 和 $m(H_0)$ 的大小得到最终的频谱感知判决结果, 即

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

4 基于 DS 证据理论的协作频谱感知改进方法

针对现有基于 DS 证据理论的协作频谱感知方法存在的问题, 本文提出了一种改进的协作频谱感知方法。首先, 在本地感知时, 每个 SU 使用投影近似法分解并调整 BPA, 从而减少 SU 发送至 FC 的数据量; 其次, FC 根据各 SU 证据矢量之间的距离计算可信度, 将可信度作为权重对每个 SU 的 BPA 进行加权, 以减小高度冲突数据对 Dempster 合成结果的影响。

4.1 投影近似法调整 BPA

为了减少发送到 FC 的数据量, 使用投影近似法对 BPA 进行调整。首先, 使用正交分解将 $m_i(\Omega)$ 投影到假设 H_1 和 H_0 的坐标轴上, 得到 $m_i(\Omega)$ 的投影为

$$\begin{cases} \alpha_{H_1} = \frac{m_i(H_1) \cdot m_i(\Omega)}{\sqrt{m_i(H_1)^2 + m_i(H_0)^2}} \\ \alpha_{H_0} = \frac{m_i(H_0) \cdot m_i(\Omega)}{\sqrt{m_i(H_1)^2 + m_i(H_0)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

然后, 分别将 2 个假设 H_1 和 H_0 的 BPA 与其对应坐标轴上的投影相加, 并进行归一化, 得到调整后的 BPA 为

$$\begin{aligned} m'_i(H_1) &= \frac{m_i(H_1) + \alpha_{H_1}}{(m_i(H_1) + \alpha_{H_1}) + (m_i(H_0) + \alpha_{H_0})} \\ m'_i(H_0) &= \frac{m_i(H_0) + \alpha_{H_0}}{(m_i(H_1) + \alpha_{H_1}) + (m_i(H_0) + \alpha_{H_0})} \end{aligned} \quad (8)$$

由于 $m'_i(H_1) + m'_i(H_0) = 1$, 使得 $m'_i(\Omega) = 0$, 因此第 i 个 SU 只需发送 $m'_i(H_1)$ 到 FC, 减少了发送到 FC 的数据量。

4.2 处理高度冲突数据方法

FC 接收到所有 SU 发送的感知数据 $m'_i(H_1)$,

$i=1,2,\dots,n$ 后, 根据已知 $m_i'(H_0) = 1 - m_i'(H_1)$ 恢复假设 H_0 的 BPA。定义证据矢量 $\vec{m}_i = (m_i'(H_1), m_i'(H_0))$, 计算第 i 个 SU 的证据矢量 \vec{m}_i 和第 j 个 SU 的证据矢量 \vec{m}_j 之间的距离^[11]为

$$d(\vec{m}_i, \vec{m}_j) = \sqrt{\frac{1}{2}(\|\vec{m}_i\|^2 + \|\vec{m}_j\|^2 - 2\langle \vec{m}_i, \vec{m}_j \rangle)} \quad (9)$$

其中, $\langle \vec{m}_i, \vec{m}_j \rangle = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 m_i'(A_k) m_j'(A_l) \frac{|A_k \cap A_l|}{|A_k \cup A_l|}$,

$$A_k, A_l \in \{H_0, H_1\}, \quad \|\vec{m}\|^2 = \langle \vec{m}, \vec{m} \rangle。$$

如果 2 个证据矢量之间的距离越小, 表示它们越相似。因此, 证据矢量 \vec{m}_i 和 \vec{m}_j 的相似性测度定义为

$$Sim(\vec{m}_i, \vec{m}_j) = 1 - d(\vec{m}_i, \vec{m}_j) \quad (10)$$

而证据矢量 \vec{m}_i 和 \vec{m}_j 之间的支持度会随其相似性测度增加而增长。因此, 第 i 个 SU 的证据矢量 \vec{m}_i 得到所有其他 SU 对它的支持度为

$$Sup(\vec{m}_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n Sim(\vec{m}_i, \vec{m}_j) \quad (11)$$

定义 \vec{m}_i 的可信度为

$$Crd(\vec{m}_i) = \frac{Sup(\vec{m}_i)}{\sum_{i=1}^n Sup(\vec{m}_i)} \quad (12)$$

可信度的定义说明一个证据矢量的可信度与其得到其他证据矢量的支持度成正比。以可信度 $Crd(\vec{m}_i)$ 为权重, 对所有 SU 的 BPA 进行加权求和得到加权平均 BPA, 为

$$\begin{aligned} m_{ave}(H_0) &= \sum_{i=1}^n Crd(\vec{m}_i) m_i'(H_0) \\ m_{ave}(H_1) &= \sum_{i=1}^n Crd(\vec{m}_i) m_i'(H_1) \end{aligned} \quad (13)$$

如果系统中有故障节点发送高度冲突数据, 那么该故障节点与其他节点的证据矢量间的距离就大, 可信度就低, 那么它对加权平均 BPA 的影响就小, 从而减小高度冲突数据对最终判决的影响。

使用 Dempster 合成规则, 用加权平均 BPA 更新每个 SU 的 BPA, 并代入式(5), 得到融合后的 BPA^[12]为

$$\begin{aligned} m(H_0) &= \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_0} \prod_{i=1}^n m_{ave}(A_i) \\ m(H_1) &= \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_1} \prod_{i=1}^n m_{ave}(A_i) \end{aligned} \quad (14)$$

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

因为只有当 $A_1 = A_2 = \dots = A_n = H_0$ 时, 才有 $A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = H_0$, H_1 的情况同理, 所以可将式(14)化简为

$$\begin{cases} m(H_0) = \frac{[m_{ave}(H_0)]^n}{1-K} \\ m(H_1) = \frac{[m_{ave}(H_1)]^n}{1-K} \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 比较 $m(H_1)$ 和 $m(H_0)$ 的大小等效于比较 $m_{ave}(H_1)$ 和 $m_{ave}(H_0)$ 的大小。因此, 最终判决可以简化为

$$\begin{aligned} H_1 : m_{ave}(H_1) &> m_{ave}(H_0) \\ H_0 : m_{ave}(H_1) &< m_{ave}(H_0) \end{aligned} \quad (16)$$

综上所述, 新方法的实现步骤如下。

- 1) SU 进行本地感知得到 2 个假设 H_1 和 H_0 及 Ω 的 BPA。
- 2) SU 通过投影近似法分解 Ω 并调整 H_1 和 H_0 的 BPA, 把 $m_i'(H_1)$ 发送至 FC。

3) FC 接收 SU 发送的感知数据, 根据证据矢量之间的距离估计每个证据的可信度。

4) FC 把可信度作为权重系数计算加权平均 BPA, 并做出最终判决。

5 仿真结果

考虑图 1 所示的协作频谱感知系统, 假设 LU 信号是数字广播电视 DVB 信号, LU 信号存在与否的概率均为 0.5, 信号带宽为 6 MHz; 系统中有 10 个 SU, 其中, 5 个 SU 的接收信噪比为 -14 dB, 其他 5 个 SU 的接收信噪比取值为 -22 ~ -6 dB, 至少有 1 个故障用户发送高度冲突数据; 本地感知时间为 50 μ s。使用 Monte Carlo 方法评估算法性能, 仿真次数为 100 000 次。

由于协作感知由本地感知和数据融合两部分组成, 因此比较了使用不同本地感知方法和融合方法组成的协作频谱感知方案, 每个方案所使用的具体方法如表 1 所示。

图 2 给出了方案 1 和方案 2 分别在无高度冲突数据和有高度冲突数据时的检测性能。从图 2 中可以看出, 在无高度冲突数据时, 方案 2 与方案 1 的

检测概率和虚警概率几乎相等，但是方案 2 减少了发送至 FC 的数据，降低了带宽开销。当存在高度冲突数据时，2 个方案的检测性能均有明显下降，但是方案 2 的检测性能优于方案 1。这是因为投影近似法中不确定性的分解没有采用固定比例分配，而是根据 2 种假设的 BPA 比值分配，这种分配方式可以减小高度冲突数据对合成结果的影响。为了进一步改善高度冲突数据时的检测性能，本文提出了新的融合方法。

表 1 仿真方案说明

方案标号	SU 本地感知方法改进	FC 融合方法改进
方案 1	文献[9]	文献[9]
方案 2	投影近似法	文献[9]
方案 3	文献[9]	处理高度冲突数据方法
方案 4	投影近似法	处理高度冲突数据方法

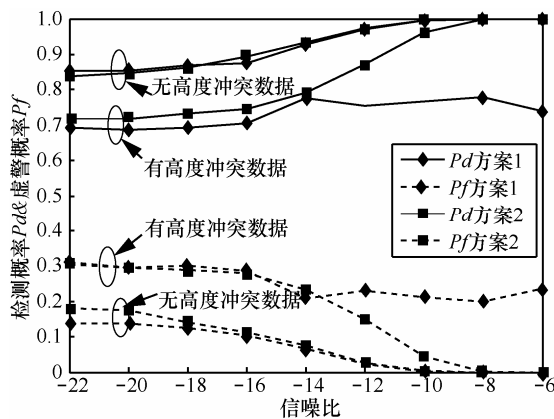


图 2 本文投影近似法改进算法检测性能 (1 个故障用户)

图 3 给出了方案 1、方案 3、方案 4 在有高度冲突数据时的检测性能。仿真结果说明，与方案 1 相比，方案 3 提高了检测概率，降低了虚警概率。方案四通过联合使用投影近似法和处理高度冲突数据方法，减小了带宽开销，但是检测性能与方案 3 几乎相同。因此，与方案 1 相比，方案 4 不仅减小了报告信道带宽，还提高了高度冲突数据存在时的检测性能。

通常 CR 系统中会有多个 SU 出现故障，因此还需考虑多个故障用户出现的情况。系统中有 20 个 SU，其中，10 个 SU 的接收信噪比为 -14 dB，其他 10 个 SU 的接收信噪比取值为 -22 ~ -6 dB，故障用户占 SU 总数比例 *ratio* 分别为 5%、10%、15%，其余仿真参数不变，得到仿真结果如图 4 所示。

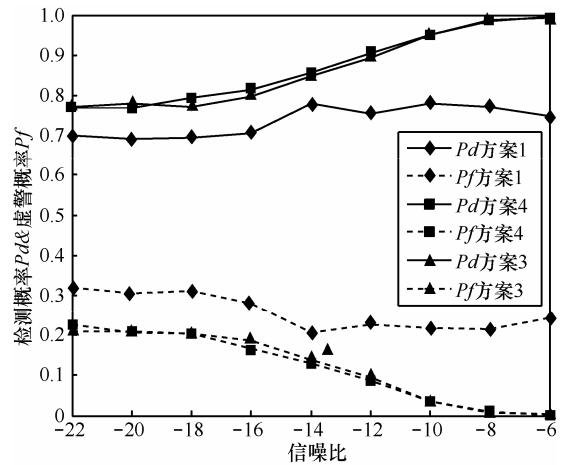


图 3 有高度冲突数据时新方法的检测性能 (1 个故障用户)

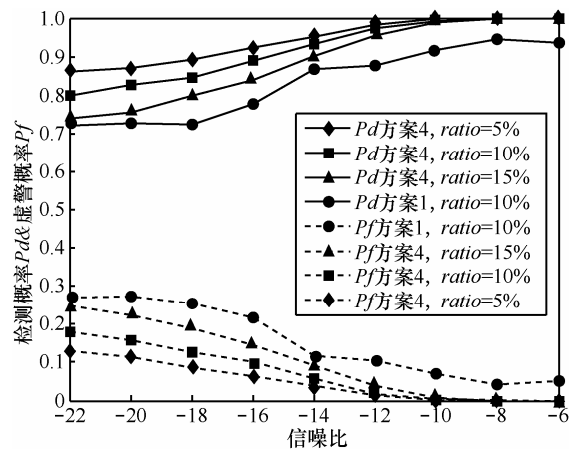


图 4 不同故障用户数目时改进方案的检测性能

图 4 说明故障用户数增多时，即出现多个高度冲突数据时，方案 4 的检测性能略有下降，在 *ratio*=15% 时，方案 4 仍优于方案 1 在 *ratio*=10% 时的检测性能。仿真结果说明当多个故障用户存在时，方案 4 仍能有效地处理高度冲突数据，提高了检测性能。

6 结束语

本文提出了一种基于 DS 证据理论的协作频谱感知改进方法。针对现有方法对报告信道带宽需求高的问题，本文在本地感知过程中采用投影近似法调整 BPA，减少发送到 FC 的数据量，从而减小所需报告信道带宽，也就减小了协作开销。针对高度冲突数据影响 Dempster 合成结果的问题，在融合中心根据次级用户证据矢量之间的距离计算可信度，以可信度为权重对每个次级用户的 BPA 进行加权平均，且根据 Dempster 合成规则得到最终判决策略。仿真结果表明，新的协作频谱感知方法能够在

减小协作开销的同时提高检测性能。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(1):116-130.
- [3] HUSSAIN S, FERNANDO X. Spectrum sensing in cognitive radio networks: up-to-date techniques and future challenges[A]. 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)[C]. Toronto, Canada, 2009.736-741.
- [4] ATAPATTU S, JIANG H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4):1232-1241.
- [5] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part II: multiuser networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6):2214-2222.
- [6] YU R, ZHANG Y, YI L, *et al.* Secondary users cooperation in cognitive radio networks: balancing sensing accuracy and efficiency[J]. IEEE Wireless Communications, 2012,19(2):30-37.
- [7] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Physical Communication, 2011, 4(1):40-62.
- [8] PENG Q H, ZENG K, LI S Q, *et al.* A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context[A]. The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)[C]. Helsinki, Finland, 2006.1-5.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] JOUSSELME A L, GRENIER D, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence[J]. Information Fusion, 2001, 2(2):91-101.
- [12] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 1(29):1-9.

作者简介:



于美婷(1986-),女,河北廊坊人,西安电子科技大学硕士生,主要研究方向为认知无线电、协作频谱感知算法。



赵林靖(1976-),女,陕西西安人,博士,西安电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为认知无线网络、异构无线网络资源管理。



李钊(1981-),男,陕西西安人,博士,西安电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为MIMO无线通信、认知无线电。