

# 基于可信度的双门限 DMM 协作频谱感知算法

高 鹏<sup>1</sup> 刘芸江<sup>1</sup> 高维廷<sup>1</sup> 李 曼<sup>2</sup> 陈 娟<sup>3</sup>

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)<sup>1</sup> (西安航空学院计算机学院 西安 710077)<sup>2</sup>  
(91917 部队 北京 102401)<sup>3</sup>

**摘 要** 针对已有的双门限特征值频谱感知算法存在忽略本地感知用户可靠性差异及融合判决方式开销大的缺点,提出了一种基于可信度的双门限 DMM 协作频谱感知算法(DT-CDMM),用于进一步提升协作感知性能。所提算法在最大最小特征值差(DMM)算法的基础上,建立了基于特征极限分布的双门限 DMM 算法作为本地感知,采用触发式的软、硬判决相结合的判决机制来减少系统开销,以本地感知性能与可信度加权的方式得到全局判决结果,并对硬判决进行自适应补偿。仿真结果表明,较已有的双门限特征值算法以及双门限能量检测算法,DT-CDMM 算法在噪声不确定的环境下提升了多用户协作检测的概率。

**关键词** 特征值,协作频谱感知,特征极限分布,最大最小特征值差,可信度

**中图分类号** TN92 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.027

## Double Thresholds DMM Cooperative Spectrum Sensing Algorithm Based on Credibility

GAO Peng<sup>1</sup> LIU Yun-jiang<sup>1</sup> GAO Wei-ting<sup>1</sup> LI Man<sup>2</sup> CHEN Juan<sup>3</sup>

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)<sup>1</sup>

(Computer Institute, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)<sup>2</sup>

(The Army of 91917, Beijing 102401, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Because the eigenvalue-based double thresholds spectrum sensing algorithms overlook the reliability difference between second users(SU) and the high expense of fusion decisions, a double thresholds DMM cooperative spectrum sensing algorithm based on credibility(DT-CDMM) was proposed to improve the sensing performance. Based on the difference between maximum and minimum eigenvalue(DMM) algorithm, a double thresholds DMM spectrum sensing algorithm based on limiting eigenvalue distribution is used as SU's local sensing, a triggered mechanism combined with soft and hard decisions is established to cut the system expenses, the final decision is obtained via the weighting of SU's sensing performance and local credibility, and a self-adaption compensation for hard decisions is applied. Theory analysis and simulations show that the DT-CDMM improves the probability of multi-user collaborative detection compared with double eigenvalue thresholds algorithms and double thresholds energy detection algorithm when noise is undefined.

**Keywords** Eigenvalue, Cooperative spectrum sensing, Limiting eigenvalue distribution, DMM, Credibility

## 1 引言

无线频谱属于非再生资源,提高频谱资源利用率是日益增长的无线通信业务的迫切需求<sup>[1]</sup>。频谱感知技术通过实时检测“频谱空穴”(White Space),来准确地判断主用户(Primary User, PU)的授权频率资源是否空闲,以供认知用户(Second User, SU)接入使用。该技术被认为是解决目前频谱资源紧张的重要技术。

目前,现有的频谱感知算法主要有:匹配滤波检测、循环平稳特征检测、能量检测、特征值类频谱感知等<sup>[2]</sup>。特征值类算法<sup>[3-4]</sup>将特征结构作为检测统计量,其因可消除噪声不确定

性的影响而得到广泛关注。实际通信环境中存在着多径衰落、阴影效应以及隐蔽节点等问题,多用户协作感知相较于单用户感知具有更好的检测性能<sup>[1]</sup>。目前,对于协作感知的研究主要集中在以能量检测为本地感知的范畴,通过利用噪声不确定建立双门限,并结合多用户“信任度”通过软、硬判决融合来实现协作<sup>[5-7]</sup>,而以特征值检测为本地检测的协作算法则较少。经典的特征值类算法<sup>[8-9]</sup>通过融合中心分析采样协方差矩阵的特征值得到感知判决,实质上其为一种集中式、等权重加成的硬判决融合方式,并未实现真正意义上的“协作”。多天技术应用于特征值类算法中<sup>[10-11]</sup>,通过天线空间分集使多用户具备了本地判决能力,实现了该类算法的软判决融

到稿日期:2017-07-01 返修日期:2017-10-22 本文受国家自然科学基金(61571364),博士后科学基金(2016M603044)资助。

高 鹏(1992-),男,硕士生,主要研究方向为频谱感知, E-mail: meickey123@163.com; 刘芸江(1976-),男,硕士生导师,主要研究方向为军事航空通信, E-mail: lyjafeu@163.com(通信作者); 高维廷(1984-),男,讲师,主要研究方向为频谱管理; 李 曼(1977-),女,副教授,主要研究方向为计算机应用; 陈 娟(1984-),女,助理工程师,主要研究方向为通信组网。

合。文献[12]提出的协作算法,以特征极限分布建立双门限,提升了特征值类算法的检测概率与可靠性,但忽略了多用户环境的差异性影响以及对门限中间模糊部分的处理。文献[13]结合能量检测与特征值类算法,以双门限能量检测为本地感知进行用户筛选,在融合中心利用特征值类算法进行判决,提升了检测精度,但同时也增大了系统开销。文献[14]在能量检测中提出了触发式两步感知,在保证性能的同时降低了系统开销。

本文以 DMM 算法为本地检测算法,利用特征极限分布推导双门限,采用触发式的感知方式对门限中间模糊部分的用户采用“信任度”加权,同时自适应调节虚警概率来修正模糊区间的用户门限,结合软、硬判决实现最终的全局协作判决。

## 2 频谱感知模型

### 2.1 协作频谱感知场景

如图 1 所示,在认知无线网络中,主用户( $PU_1, PU_2, PU_3, \dots$ )通过主基站(Primary Base Station, PBS)进行通信;认知用户( $SU_1, SU_2, SU_3$ )协同对  $PU$  信号进行检测。由于多径衰落、阴影效应等因素的影响,不同  $SU$  的检测数据存在可靠性差异,数据融合中心(Fusion Center, FC)将  $SU$  的本地感知结果按一定融合规则处理后做出全局判决,判断该  $PU$  的授权频段是否存在频率空洞以供  $SU$  接入使用,并将结果送至次级基站(Second Base Station, SBS)。

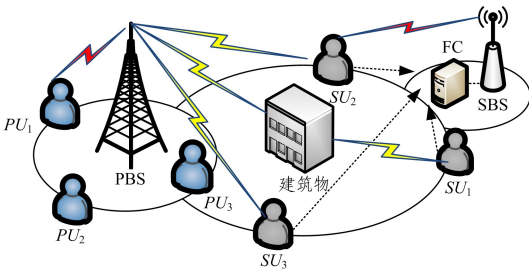


图 1 协作频谱感知场景

Fig. 1 Cooperative spectrum sensing scene

### 2.2 本地频谱感知模型

采用认知无线电中经典的二元假设模型<sup>[1]</sup>,假设在认知无线网络中,只存在一个  $PU$ ,单个  $SU$  以多接收天线的方式对其信号进行检测判决,可以概括为单发射天线的 MIMO 模型,其数学描述如下:

$$x_i(n) = \begin{cases} \omega_i(n), & H_0 \\ h_i(n)s_i(n) + \omega_i(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $H_0$  与  $H_1$  分别代表  $PU$  信号存在与不存在的情况, $x_i(n)$  为  $SU$  第  $i$  根天线接收到的采样信号, $s_i(n)$  与  $\omega_i(n)$  分别为待测  $PU$  信号和干扰噪声, $h_i(n)$  为信道衰落因子。不失一般性,假设如下:

- 1) 干扰噪声为高斯白噪声,并且服从  $\omega_i(N) \sim N(0, \sigma^2)$ ;
- 2)  $PU$  信号的  $s_i(n)$  幅值服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布,且与噪声相互独立;
- 3)  $SU$  的  $M$  根天线检测一个  $PU$  的同一频段,各天线之间相互独立;

4) 检测期间信道特征稳定, $h_i(n)$  以瑞利衰落信道描述:

$$f_r(SNR_i) = \frac{1}{SNR} e^{(-SNR_i/SNR)} \quad (2)$$

其中, $SNR_i$  为  $SU$  的第  $i$  根天线的接收信噪比,同时假定  $\overline{SNR} = \overline{SNR_i}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ )。

对  $SU$  的  $M$  根天线采样  $N$  次,本地感知模型可以概括为:

$$X = Hs + \omega \quad (3)$$

其中, $X$  为  $M \times N$  的矩阵,其中的每个元素  $x_i(n)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M; n=1, 2, 3, \dots, N$ ) 表示  $SU$  的第  $i$  根天线在时刻  $n$  的采样值。采样信号协方差在  $N$  较大时可近似表示为:

$$R_x(N) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n)^T = \frac{1}{N} XX^T \quad (4)$$

采样信号协方差在  $H_0$  与  $H_1$  时可表示为:

$$R_x(N) = \begin{cases} \sigma^2 I_M, & H_0 \\ HR_i H_i^T + \sigma^2 I_M, & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

当  $H_0$  成立时,只存在高斯白噪声,最大特征值  $\lambda_{\max}$  与最小特征值  $\lambda_{\min}$  均为  $\sigma^2$ 。当  $H_1$  成立时,因  $s(n)$  自身在不同采样时刻具有相关性,使得最大、最小特征值不再相等,即  $\lambda_{\max} = \rho_{\max} + \sigma^2$ ,  $\lambda_{\min} = \rho_{\min} + \sigma^2$ ,  $\rho_{\max}$  与  $\rho_{\min}$  分别为  $R_{H_1}(N)$  的最大与最小特征值。接收信号的最大、最小特征值在  $PU$  存在时的差异性为检测提供了思路。

### 2.3 DMM 算法

最大、最小特征值之差(DMM)算法<sup>[9]</sup>是基于接收信号的最大、最小特征值在  $PU$  存在时的差异性,因此 DMM 算法的检测统计量为:

$$T_{\text{DMM}} = \lambda_{\max} - \lambda_{\min} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \gamma_{\text{DMM}} \quad (6)$$

其中, $\gamma_{\text{DMM}}$  为判决门限。通过在  $H_0$  时设定虚警概率,利用 Wishart 随机矩阵的最大特征值极限分布与  $\lambda_{\min}$  的极限近似值,推导出 DMM 算法的半渐进门限。

**定理 1**<sup>[8]</sup> 当信号为实信号时,满足:

$$A(N) = \frac{N}{\sigma^2} R_{\omega}(N) \quad (7)$$

当其中的参数满足  $\mu = (\sqrt{N-1} + \sqrt{M})^2$  和  $\nu = (\sqrt{N-1} + \sqrt{M})(1/\sqrt{N-1} + 1/\sqrt{M})^{1/3}$ ,且  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M}{N} = c$  ( $0 < c < 1$ ) 时,  $\frac{\lambda_{\max}(A(N)) - \mu}{\nu}$  服从一阶 Tracy-Widom 分布  $F_1(t)$ ,  $\lambda_{\max}(A(N))$  为随机矩阵  $A(N)$  的最大特征值。

**定理 2**<sup>[8]</sup> 当满足  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M}{N} = c$  ( $0 < c < 1$ ) 时, Wishart 随机矩阵的特征值极限表达式为:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \lambda_{\min} = \frac{\sigma^2}{N} a = \frac{\sigma^2}{N} (\sqrt{N} - \sqrt{M})^2 \quad (8)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \lambda_{\max} = \frac{\sigma^2}{N} b = \frac{\sigma^2}{N} (\sqrt{N} + \sqrt{M})^2 \quad (9)$$

其中, $a$  和  $b$  分别为 M-P 定律中最小、最大特征值的收敛值,且  $a = \sigma^2(1 - \sqrt{c})^2$ ,  $b = \sigma^2(1 + \sqrt{c})^2$ 。

得到 DMM 算法的判决门限为<sup>[9]</sup>:

$$\gamma_{\text{DMM}} = \frac{\sigma^2}{N} (\nu F_1^{-1}(1 - P_{fa}) + \mu - a) \quad (10)$$

DMM算法利用特征值噪声估计法<sup>[9]</sup>对噪声进行实时的估计。

$$\sigma^2 \approx (\sum_{i=1}^N \lambda_i - \lambda_{\max}) / (N-1) \quad (11)$$

通过不断地对噪声进行估计,实现了对检测门限的自适应调节<sup>[9]</sup>,降低了噪声对检测性能的影响。但DMM算法的门限为半渐进的近似门限,近似等效对检测结果带来了影响。因此,为进一步提高检测精度,将双门限检测应用于DMM算法中作为本地感知算法。

### 3 双门限DMM协作检测算法

#### 3.1 本地双门限DMM检测

双门限的检测思想在于:在单门限单纯硬判决的基础上加入了双门限之间的软判决,在软判决时通过一定的融合算法实现了更精确的检测。

DMM算法的门限 $\gamma_{\text{DMM}}$ 的计算是通过利用最大特征值的极限分布以及最小特征值的近似值获得的,参考文献<sup>[12]</sup>的思想,利用最小特征值的极限分布以及最大值的近似值,同样可以得到DMM算法的门限的另一种表达式,分别记作 $\gamma_1$ 与 $\gamma_2$ 。 $\gamma_1$ 已由文献<sup>[9]</sup>得出:

$$\gamma_1 = \frac{\sigma^2}{N} (vF_1^{-1}(1-P_{fa}) + \mu - a) \quad (12)$$

$\gamma_2$ 的计算如下。

**定理3<sup>[8]</sup>** 当信号为实信号时,满足:

$$A(N) = \frac{N}{\sigma^2} R_w(N) \quad (13)$$

当其中的参数满足  $u = (\sqrt{N-1} - \sqrt{M})^2$  和  $v = (\sqrt{N-1} - \sqrt{M})(1/\sqrt{N-1} - 1/\sqrt{M})^{1/3}$ , 且  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M}{N} = c (0 < c < 1)$  时,  $\frac{\lambda_{\min}(A(N)) - u}{v}$  服从一阶 Tracy-Widom 分布  $F_1(t)$ ,

$\lambda_{\min}(A(N))$  为随机矩阵  $A(N)$  的最小特征值。

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(\lambda_{\max} - \lambda_{\min} > \gamma_2 | H_0) \\ &= P(\lambda_{\max} - \frac{\sigma^2}{N} \lambda_{\min}(A(N)) > \gamma_2) \\ &= P(\lambda_{\min}(A(N)) < \frac{N}{\sigma^2} (\lambda_{\max} - \gamma_2)) \\ &\approx P(\frac{\lambda_{\min}(A(N)) - u}{v} < \frac{(\sqrt{N} + \sqrt{M})^2 - N\gamma_2/\sigma^2 - u}{v}) \\ &= F_1(\frac{(\sqrt{N} + \sqrt{M})^2 - N\gamma_2/\sigma^2 - u}{v}) \end{aligned}$$

经整理得:

$$\gamma_2 = \frac{\sigma^2}{N} (b - u - vF_1^{-1}(P_{fa})) \quad (14)$$

选取  $\gamma_L = \min(\gamma_1, \gamma_2)$  与  $\gamma_H = \max(\gamma_1, \gamma_2)$  作为双门限检测的两门限;对于某一  $SU$ ,  $D_i$  为对应的 1bit 本地判决结果:

- 1) 当  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} < \gamma_L$  时,表示未检测到  $PU$  信号,硬判为  $H_0$ ,令  $D_i = 0$ ;
- 2) 当  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} > \gamma_H$  时,表示检测到  $PU$  信号,硬判为  $H_1$ ,令  $D_i = 1$ ;
- 3) 当  $\gamma_L \leq \lambda_{\max} - \lambda_{\min} \leq \gamma_H$  时,表示落入模糊区间,需进一步软判决处理。

硬判决表明“特征”明显,做出硬判决结果的  $SU$  将  $D_i$  由控制信道送至  $FC$ 。为保证  $PU$  的当前业务不受干扰, $FC$  采用“OR”的融合处理准则判断  $PU$  的存在与否。

假定  $K$  个  $SU$  在一轮感知判决过程中:

- 1) 当  $FC$  收到  $D_i = 1$  时,存在某个  $SU$  硬判决  $PU$  存在,立即做出全局判决为  $H_1$ ;
- 2) 当  $FC$  只收到  $D_i = 0$  的本地判决,且累积数量为  $K$ ,全局判决为  $H_0$ ;
- 3) 当  $FC$  只收到  $D_i = 0$  的本地判决,而判决的累计数量小于  $K$  时, $FC$  不做出全局判决;软判决阶段激发,落入双门限之间模糊区间的  $SU$  将本地信噪比以及感知计算结果发送至  $FC$ , $FC$  利用“信任度”加权的方式进行决策融合,得出最终的全局判决。

#### 3.2 基于“信任度”的加权融合

模糊区间存在的原因是:受多径衰落、阴影效应等影响, $PU$  信号在被  $SU$  接收时衰落严重,信噪比降低。不同地理位置下的  $SU$  的衰落程度不同且信噪比各异;特征值类算法对信噪比参数敏感,造成了不同  $SU$  间本地检测性能的差异。对于模糊区间中的  $SU$ ,本地信噪比是影响检测性能的直接体现,因此选取信噪比作为加权因子,通过本地的实际检测量构建“信任度”函数,加权处理后在  $FC$  进行单门限判决,最终得到全局判决,如图 2 所示。

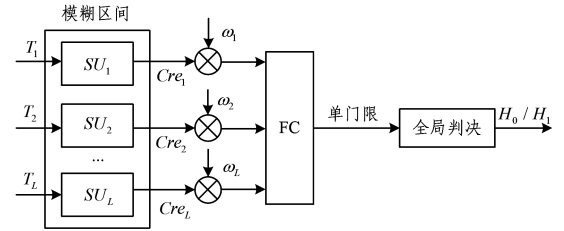


图2 加权融合示意图

Fig. 2 Diagram of weighted data fusion of second users

因为  $PU$  信号在不同  $SU$  处的衰落程度不同,所以信噪比越高,代表接收  $PU$  信号的功率越高,相应的“信任度”也越高,其检测性能越可靠,应给予较高的加成因子;反之,对于信噪比较低的  $SU$ ,要削弱其对整体加权的影响。以模糊区间的中间值为界限,认为低于该界限的统计量有更大的可能被划归  $H_0$ ,高于该界限的统计量有更大的可能被划归  $H_1$ ,同时结合不同  $SU$  “信任度”的加成,最终以是否超过模糊区间中间值为软判别的依据。

不同信噪比下的  $SU$  “信任度”如图 3 所示,以区间比值的形式定义每个  $SU$  的信任度函数为:

$$Cre_j = \frac{T_j - \gamma_{Lj}}{\Delta\gamma_j}, 0 < j < L, L < K \quad (15)$$

其中, $K$  为  $SU$  的总数, $L$  为处于模糊区间的  $SU$  数量, $T_j$  与  $\Delta\gamma_j$  分别为第  $j$  个用户的本地检测统计量与模糊区间宽度,且  $T_j = \lambda_{j\max} - \lambda_{j\min}$ ,  $\Delta\gamma_j = \gamma_{Hj} - \gamma_{Lj}$ 。

以本地信噪比计算加权因子  $\omega_j$ :

$$\omega_j = \frac{SNR_j}{\sum_{j=1}^L SNR_j} \quad (16)$$

因此,得到全局检测统计量  $T_{\text{all}}$ :

$$T_{\text{all}} = \sum_{j=1}^L \omega_j \cdot \text{Cre}_j \quad (17)$$

且全局判决规则为:

$$D_{\text{all}} = \begin{cases} T_{\text{all}} \leq 0.5, & H_0 \\ T_{\text{all}} > 0.5, & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

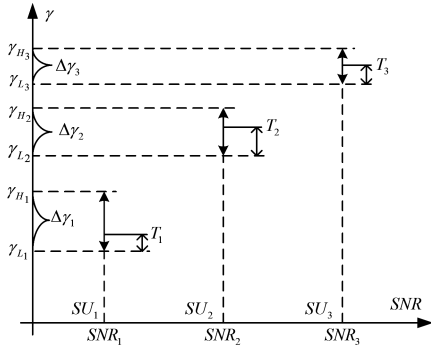


图 3 SU“信任度”示意图

Fig. 3 Credibility of different second users

硬判决阶段判断 PU 信号存在与否时,软判决不被激发以节约信道带宽并增强检测的实时性。因此,从整体性能的角度,应尽量提升硬判决阶段的成功率,尽量减少软判决阶段的激发。

在一轮感知结束后,需要对模糊区间的 SU 进行一定的自适应调整,根据其所处位置的信噪比强弱,通过修正门限提升或降低其检测概率,使调整的 SU 在下一轮的感知中有更大的概率划归硬判决,以达到减少模糊区间 SU 数量的目的。

由 3.1 节可知,当固定采样点数、接收天线数时,检测概率与由虚警概率推导的检测门限密切相关。因此,通过自适应调节虚警概率,进而调节门限的大小,来实现对检测性能的补偿。结合不同信噪比下的 SU“信任度”差异,对于高信噪比的 SU,适当提高虚警概率,降低检测上门限值,检测概率提升使得 SU 的状态更容易判为  $H_1$ ;对于低信噪比的 SU,适当降低虚警概率,提高检测下门限值,使 SU 的状态更容易判为  $H_0$ ,从而实现在下一轮感知中减少模糊区间中 SU 的数量。

因此,设置虚警概率的自适应因子  $\alpha$ ,其满足:

$$P_{fj} = \alpha_j P_f, 1 < j < L \quad (19)$$

为保证对初始虚警概率  $P_f$  的调节可控制在一定小范围内,并使高信噪比 SU 对应的  $\alpha$  值较大,低信噪比 SU 对应的  $\alpha$  值较小,以偏离 SU 的信噪比均值的程度确定  $\alpha_j$  的取值。因此定义偏离程度  $\theta$  为:

$$\theta_j = \frac{|\overline{\text{SNR}} - \text{SNR}_j|}{\text{SNR}_{\text{max}} - \text{SNR}_{\text{min}}}, 0 < j < L \quad (20)$$

且对于  $\alpha$  满足:

$$\alpha_j = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2}\theta_j^2, & \text{SNR}_j \leq \overline{\text{SNR}} \\ 1 + \frac{1}{2}\theta_j^2, & \text{SNR}_j > \overline{\text{SNR}} \end{cases} \quad (21)$$

对于低信噪比 SU,  $0.5 < \alpha \leq 1$ ;对于高信噪比 SU,  $1 < \alpha < 1.5$ ;对于接近信噪比均值的 SU,虚警概率几乎维持不变。信道特征稳定时,在下一轮感知中,通过调节虚警概率来修正门限可减少模糊区间 SU 的数量。

### 3.3 算法的整体过程与分析

所提出的双门限 DMM 协作感知算法(DT-CDMM 算法)的整体流程如图 4 所示。

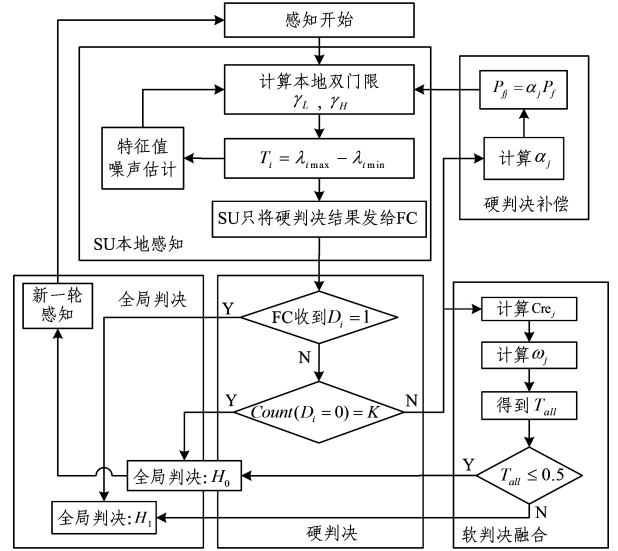


图 4 DT-CDMM 算法的整体流程

Fig. 4 Whole process of DT-CDMM algorithm

DT-CDMM 算法的具体步骤如下。

1) 一轮感知开始。

2) SU 本地感知:所有的 SU 本地感知采用双门限 DMM 算法,计算本地双门限、检测统计量,得到本地判决结果,只将硬判决结果发送给 FC,同时利用特征值噪声估计法估计背景噪声。

3) 硬判决:按照 2.1 节的规则,FC 若在该阶段能够做出全局判决,则结束本轮感知。

4) 软判决融合:硬判决阶段无法做出全局判决,激活软判决融合阶段,利用信噪比对模糊区间的 SU“信任度”线性加权,得到全局检测统计量并进行单门限判决,得到全局判决结果。

5) 硬判决补偿:在软判决融合阶段之后,在新一轮感知之前,对模糊区间的 SU 自适应调节虚警概率,进而改变双门限值,减少下一轮感知中模糊区间的 SU 数量。

6) 本轮感知结束,开始下一轮感知。

分析上述过程,硬判决阶段只需向 FC 发送 1bit 0/1 数据,而软判决阶段需向 FC 发送本地统计信息,占用大量带宽。因此,只有在硬判决阶段无法得出判决结论时才会触发软判决阶段以及硬判决补偿阶段的设置,从而实现检测性能与系统开销的折中。同时,硬判决补偿通过微调自身参数来减少下一轮感知中参与软判决的 SU 数量进而降低系统的开销。

### 4 仿真结果与性能分析

对上述理论进行仿真验证,分析比较 DT-CDMM 算法在 SU 本地的感知性能以及在 FC 的协作感知性能。假设待检 PU 信号为 QPSK 信号,输入 PU 信号与加性高斯白噪声,进行 5000 次 Monte-Carlo 仿真实验。为提高 SU 接入的机会、提高频谱的整体利用率,当固定较低的  $P_{fa}(P(H_1 | H_0))$  值时,应尽量提升  $P_d(P(H_0 | H_1))$ ,因此将固定  $P_{fa}$  时的  $P_d$  作

为评估算法的标准。

#### 4.1 本地感知性能的仿真分析

对于单个用户,信噪比是多径衰落、阴影效应等因素的直接体现,是本地环境质量的主要指标。对于单个 SU,在不同的信噪比下将本文的双门限 DMM 算法(DF-DMM)与文献[12]的双门限 MME 算法(DT-MME)、文献[13-14]的双门限 ED 算法进行比较。根据文献[9]设定噪声不确定性,同时以此数值设定双门限 ED 算法的上下门限(DT-ED 为不存在噪声不确定性环境,DT-ED-1 为存在 1dB 噪声不确定性环境);对于上述双门限算法的中间模糊部分均不做处理,设置采样点数为 5000, SU 天线数为 5,虚警概率为 5%。检测概率与本地信噪比的仿真结果如图 5 所示,以验证本地感知算法的性能。

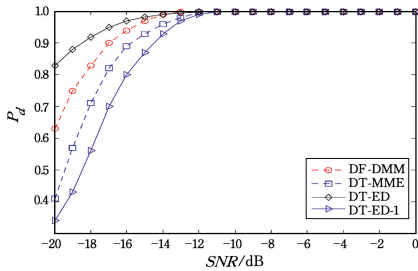


图 5 检测概率随信噪比的变化图

Fig. 5 Variation of detection probability with SNR

无噪声不确定性的双门限 ED 算法在低信噪比下的检测性能最佳,在 -18 dB 可以达到 90% 以上,但在噪声不确定时存在性能下滑的问题,尤其在低信噪比时下滑严重;其次为双门限 DMM 算法,其在低信噪比时的检测性能优于双门限 MME 算法,原因在于 DMM 算法具有随噪声变化的自适应门限,而恒定的门限的 MME 算法在低信噪比时容易发生漏检,因此验证了选取双门限 DMM 作为本地感知的合理性。

#### 4.2 协作感知性能的仿真分析

对于多用户,本地信噪比的差异是导致本地检测差异性的主要因素,因此对于多个 SU,在不同信噪比且其他本地因素设定一致时比较分析各算法在 FC 处的检测性能的差异。SU 的采样点数均为 5000,初始虚警概率为 5%,本地天线数均为 5,存在噪声不确定度 1 dB。在图 5 所示结果的基础上,信噪比在 [-20 dB, -16 dB] 之间的检测概率最为敏感,因此选择 SU 信噪比在 [-20 dB, -16 dB] 之间随机分布,以验证不同信噪比下双门限算法模糊区间的处理能力。文献[12]的双门限 MME 的模糊区间以二分的概率加成(DT-CMME),文献[13]的双门限 ED 的模糊区间以 MME 集中式硬判决(DT-ED-MME-1,能量检测中设定 1dB 噪声不确定性),文献[14]的双门限 ED 的模糊区间按信噪比加权(DT-ED-1,能量检测中设定 1dB 噪声不确定性),将上述 3 种算法与本文是否有硬判决补偿的 DT-CDMM 算法进行比较。

图 6 给出了在不同 SU 数量下各算法检测性能的比较。随着 SU 数量的增加,检测概率均得到快速提升,其中本文提出的 DT-CDMM 算法上升速度最快,证明了其在模糊区间的 SU 处理方式,相较于其他算法提升了协作检测的概率;去除硬判决补偿的 DT-CDMM 算法的检测性能下降,且随着 SU

数量的增加差距加大,这表明补偿能够有效地将模糊区间的 SU 移向硬判决区。

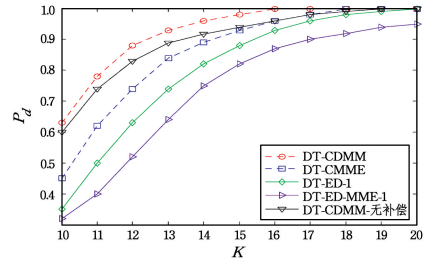


图 6 检测概率随 SU 数量的变化图

Fig. 6 Variation of detection probability with numer of SU

在图 6 的基础上, SU 为 12 左右时曲线增速最快,因此选取 SU 的数量为 12,其他仿真条件不变,通过变化初始虚警概率,得到算法的工作特征曲线图(Receiver Operating Characteristics, ROC),如图 7 所示。存在噪声不确定度时,在低信噪比下,DT-CDMM 算法能够实现协作性能的提升。

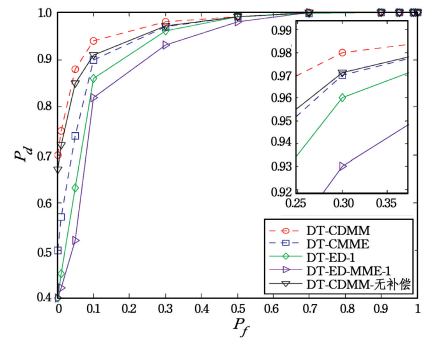


图 7 算法的 ROC 曲线图

Fig. 7 Receiver operating characteristics curve of algorithms

**结束语** 本文在 DMM 算法的基础上,提出了一种基于可信度的双门限 DMM 协作频谱感知算法。该算法以双门限 DMM 算法为本地感知,对门限内、外分别采用软、硬判决,以触发式的方式对软判决进行信任度加权以及对硬判决进行补偿,综合得到全局判决结果。理论分析与仿真结果表明,所提 DT-CDMM 算法降低了系统开销,提升了检测概率。

#### 参考文献

- [1] ROBERT C Q, ZHEN H, HUSHENG L, et al. 认知无线电通信组网:原理与应用[M]. 郎为民,等译. 第一版. 北京:机械工业出版社,2013:1-3.
- [2] PANDIT S, SINGH G. Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Potential Challenges and Future Perspective [M] // Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks. German: Springer International Publishing, 2017.
- [3] SEDIGHI S, TAHERPOUR A, GAZOR S, et al. Eigenvalue-Based Multiple Antenna Spectrum Sensing: Higher Order Moments [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 1168-1184.
- [4] LIU C, LI H, WANG J, et al. Optimal Eigenvalue Weighting Detection for Multi-Antenna Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2083-2096.

## 参考文献

- [1] CASTIGLIONE A, PALMIERI F, CHEN C L, et al. A blind signature-based approach for cross-domain authentication in the cloud environment[J]. *International Journal of Data Warehousing and Mining*, 2016, 12(1): 34-48.
- [2] PENG H X. An identity-based authentication model for multi-domain[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(8): 1271-1281. (in Chinese)  
彭华熹. 一种基于身份的多信任域认证模型[J]. *计算机学报*, 2006, 29(8): 1271-1281.
- [3] LU X M, FENG D G. An identity-based multi-trust domain grid authentication model [J]. *Journal of Electronics*, 2006, 34(4): 577-582. (in Chinese)  
路晓明, 冯登国. 一种基于身份的多信任域网格认证模型[J]. *电子学报*, 2006, 34(4): 577-582.
- [4] ZHANG W B, ZHANG H Q, ZHANG B, et al. An identity-based authentication model for multi-domain in grid environment[C]// 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 165-169.
- [5] HE D, ZEADALLY S, KUMAR N, et al. Anonymous authentication for wireless body area networks with provable security [J]. *IEEE Systems Journal*, 2016(99): 1-12.
- [6] CHOU C H, TSAI K Y, LU C F. Two ID-based authenticated schemes with key agreement for mobile environments[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2013, 66(2): 973-988.
- [7] FARASH M S, ATTARI M A. A secure and efficient identity-based authenticated key exchange protocol for mobile client-server networks [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2014, 69(1): 395-411.
- [8] NI L, CHEN G L, LI J H, et al. Strongly secure identity-based authenticated key agreement protocols without bilinear pairings [J]. *Information Sciences*, 2016, 367: 176-193.
- [9] YUAN C, ZHANG W F, WANG X M. EIMAKP: Heterogeneous cross-domain authenticated key agreement protocols in the EIM system [J/OL]. *Arabian Journal for Science and Engineering*(2017-02-23)[2017-08-02]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-017-2447-9>.
- [10] BONEH D, FRANKLIN M. Identity-based encryption from the weil pairing[C]// Annual International Cryptology Conference. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 213-229.
- [11] CHENG X G, GUO L F, WANG X M. An identity-based mediated signature scheme from bilinear pairing [J]. *International Journal of Network Security*, 2006, 2(1): 29-33.
- [12] MARTINS P, SOUSA L, CHAWAN P. Featuring immediate revocation in Mikey-Sakke (FIRM) [C]// 2015 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 501-506.
- [13] CHEN Y, JIANG Z L, YIU S M, et al. Fully secure ciphertext-policy attribute based encryption with security mediator[C]// International Conference on Information and Communications Security. Cham: Springer-Verlag, 2014: 274-289.
- [14] YUAN F, CHENG Z H. Overview on SM9 identity-based cryptographic algorithm [J]. *Information Security Research*, 2016, 2(11): 1008-1027. (in Chinese)  
袁峰, 程朝辉. SM9 标识密码算法综述[J]. *信息安全研究*, 2016, 2(11): 1008-1027.
- [15] POINTCHEVAL D, STERN J. Security arguments for digital signatures and blind signatures[J]. *Journal of cryptology*, 2000, 13(3): 361-396.
- (上接第 170 页)
- [5] ZHANG X J, LU Y, TIAN F, et al. Double-threshold cooperative spectrum sensing for cognitive radio based on trust[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(7): 362-372. (in Chinese)  
张学军, 鲁友, 田峰, 等. 基于信任度的双门限协作频谱感知算法[J]. *物理学报*, 2014, 63(7): 362-372.
- [6] JIANG X L. Double threshold collaborative spectrum sensing algorithm based on energy sensing [J]. *D' d Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2016, 26(1): 75-79. (in Chinese)  
江晓林. 基于能量检测的双门限协作频谱感知算法[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2016, 26(1): 75-79.
- [7] LI M Y, LI O, SUN W J. Double-threshold Cooperative Spectrum Sensing Algorithm Based on Noise Uncertainty[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(4): 81-86. (in Chinese)  
李明源, 李鸥, 孙武剑. 基于噪声不确定性的双门限协作频谱感知算法[J]. *计算机工程*, 2014, 40(4): 81-86.
- [8] ZENG Y H, LIANG Y C. Maximum Minimum eigenvalue detection for cognitive radio[C]// The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Athens, Greece, 2007: 1-5.
- [9] WANG Y X, LU G Y. DMM Based Spectrum Sensing Method for Cognitive Radio Systems[J]. *D' d Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2572-2574. (in Chinese)  
王颖喜, 卢光跃. 基于最大最小特征值之差的频谱感知技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(11): 2572-2574.
- [10] TSINOS C G, BERBERIDIS K. Decentralized Adaptive Eigenvalue-Based Spectrum Sensing for Multiantenna Cognitive Radio Systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 14(3): 1703-1715.
- [11] LI Z, WANG D, QI P, et al. Maximum-Eigenvalue-Based Sensing and Power Recognition for Multiantenna Cognitive Radio System[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 8218-8229.
- [12] ZOU W X, DING Q, ZHOU Z, et al. Double threshold spectrum sensing algorithm based on limiting eigenvalue distribution[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(3): 588-591. (in Chinese)  
邹卫霞, 丁奇, 周正, 等. 基于特征值极限分布的双门限协作频谱感知算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(3): 588-591.
- [13] HAREESH K, SINGH P. An energy efficient hybrid co-operative spectrum sensing technique for CRSN[C]// International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing. IEEE, 2013: 438-442.
- [14] PENG Y, CUI Z R, CHEN C K. Selectively Triggered Cooperative Spectrum Sensing in Wireless Cognitive Network[J]. *Computer Engineering*, 2017, 43(3): 89-93. (in Chinese)  
彭艺, 崔自如, 陈昌凯. 无线认知网络中的选择触发协作频谱感知[J]. *计算机工程*, 2017, 43(3): 89-93.