

# 认知无线电中的协作频谱检测技术

## Cooperative Spectrum Detection Techniques in Cognitive Radio

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: 1009-6868 (2009) 02-0010-05

**摘要:** 频谱检测技术是认知无线电中极其重要的环节, 而协作式的频谱检测由于其良好的检测性能日益受到人们的关注。基于能量检测, 协作频谱检测的算法主要有: 与(AND)算法、或(OR)算法、计数算法、分区算法、似然比算法、线性加权算法和分布式无线通信系统(DWCS)算法。分析表明, 这些协作检测算法能够改善系统的检测性能、减低干扰冲突、提高频谱利用率。

**关键词:** 认知无线电; 协作检测; 检测概率; 虚警概率

**Abstract:** The spectrum detection is one of the important steps in Cognitive Radio (CR), and the cooperative spectrum detection is popular because of its good detection ability. Based on the energy sensing, there are cooperative spectrum detection algorithms such as AND model, OR model, counting model, double threshold model, likelihood ratio model, linear cooperation model, and Distributed Wireless Communications System (DWCS) model. It is proved that significant cooperative gain can be achieved by the proposed models in reducing interference and improving spectrum usage.

**Key words:** cognitive radio; cooperative sensing; detection probability; false alarm probability

随着无线通信的飞速发展, 频谱资源短缺问题日益严重。据统计, 频谱资源在时间和空间上的利用率很低。引起这一矛盾现象的原因很大程度上在于目前固定式的频谱分配政策。

认知无线电是一种能够智能感知和适应周围无线通信环境的高新技术。通过对频谱资源的感知和利用, 认知无线电可以很好解决当前频谱分配不合理的问题<sup>[1]</sup>。目前, 美国的联邦通信委员会(FCC)已经通过了频谱重用的提案, 这一提案允许在电视系统等授权用户专用的频段中, 引入非授权的认知用户<sup>[2]</sup>。为确保不影

响当前授权用户对于该频段的使用, 认知用户必须准确检测出当前频段是否被授权用户使用。因此, 频谱检测成为认知无线电技术中极为关键的一部分。

目前, 认知无线电的频谱检测技术中的能量检测得到了广泛应用。它算法简单, 对于授权用户的信号没有先验知识要求, 适合认知无线电系统中认知用户接收信噪比低的情况。由于无线通信的特殊环境, 信号传播过程中存在多径、阴影效应等干扰因素, 因此个别认知用户由于特殊的地理位置可能会出现较低的检测概率, 从而加剧了对于授权用户的干扰。这时, 可以结合能量检测使用协作检测技术。

目前, 协作检测技术已经成为认知无线电的关键技术, 得到了广泛的

王海军/WANG Hai-jun

栗欣/SU Xin

王京/WANG Jing

(清华大学 无线与移动通信研究中心 北京

100084)

(Wireless and Mobile Communications R&D Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

关注。

### 1 能量检测

假设认知用户每次检测授权用户频段上  $N$  个连续样点:

$$y_i = \begin{cases} n_i, & H_0 \\ h^* x_i + n_i, & H_1 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中,  $n_i$  表示噪声, 这里假设  $N$  个样点上叠加的都是独立同分布的高斯白噪声且  $n_i \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $x_i$  表示授权用户信号的第  $i$  个样点,  $y_i$  表示认知用户检测到的第  $i$  个信号,  $h$  表示信道增益, 由于能量检测需要的检测时间极短, 因此我们假设在检测期间  $h$  保持不变。采用二元假设, 即  $H_0$  表示授权用户没有信号, 该频段空闲,  $H_1$  表示授权用户正在占用该频段。

能量检测的目标就是通过对认知用户所检测到的信号  $y_i$  能量的检测, 来判断假设  $H_0$  和  $H_1$  哪一个成立, 能量检测器的输出如下:

$$T = \sum_{i=1}^N |y_i|^2 \quad (2)$$

由中心极限定理可知, 当  $N$  值较大时 (一般  $N \geq 10$ ),  $T$  近似的满足高斯分布。由于高斯分布具有比较简单的数学表达, 因此一般能量检测中都采用该分布来描述:

$$E(T) = E\left(\sum_{i=1}^N |y_i|^2\right) = \begin{cases} N\sigma^2 & H_0 \\ N\sigma^2 + P & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(T) = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^N |y_i|^2\right) = \begin{cases} 2N\sigma^4 & H_0 \\ 2N\sigma^4 + 4\sigma^2 P & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 资助项目 (2007AA01Z289); 国家自然科学基金资助项目 (2007CB310608)

其中,  $P = h^2 \sum_{i=1}^N |x_i|^2$ , 即认知用户检测到的样本信号能量。

检测过程中, 先设定一个阈值  $\eta$ , 如果检测到  $T \geq \eta$ , 那么认为假设  $H_1$  成立, 即授权用户正在使用当前频段; 反之, 如果检测到  $T < \eta$ , 那么假设  $H_0$  成立, 当前频段空闲。由于  $T$  近似的满足高斯分布, 因此可以得到检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$ :

$$P_d = P(T \geq \eta / H_1) = Q\left(\frac{\eta - E(T/H_1)}{\sqrt{\text{Var}(T/H_1)}}\right) \quad (5)$$

$$P_f = P(T \geq \eta / H_0) = Q\left(\frac{\eta - E(T/H_0)}{\sqrt{\text{Var}(T/H_0)}}\right) \quad (6)$$

其中,  $Q(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta}^{\infty} e^{-x^2/2} dx$  为高斯分布的累积概率。

给定系统的检测概率  $P_d$ , 可以通过公式(5)得到阈值  $\eta$ , 然后优化虚警概率  $P_f$ ; 同样的, 给定系统的虚警概率  $P_f$ , 也可以通过公式(6)得到阈值  $\eta$ , 然后优化检测概率  $P_d$ 。

## 2 协作检测技术

由于无线信道存在多径、阴影效应等因素, 因此单一认知用户的检测在某些特殊情况下性能会很差, 图1说明了由于阴影效应, 认知用户1会错误检测到当前频段空闲, 然后会使用该频段, 从而对授权接收用户造成干扰。

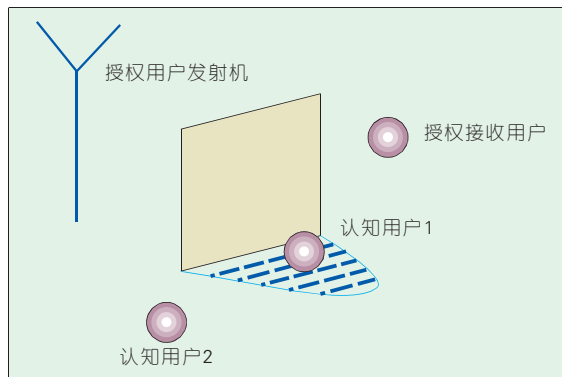
解决这个问题的方法是采用协作检测, 如图1中通过认知用户1和2的协作检测, 虽然有阴影效应的影响, 还是能够比较准确的检测出当前频段的使用情况。

认知无线电中的协作检测算法主要分为硬判决和软判决两类, 下面分别介绍这两类中的常用算法。

### 2.1 硬判决算法

硬判决协作检测算法中, 每一个认知用户的检测都采用硬判决, 判决结果只包含“0”或者“1”两种, 然后把“0”或者“1”发送到处理中心参与协作检测。硬判决协作检测常用的算法有与(AND)算法、或(OR)算法、计

图1 阴影效应对认知用户的影响



数算法等。

#### 2.1.1 AND算法

AND算法<sup>[3]</sup>是一种简单算法, 所有的用户检测当前频段的信号, 判断当前频段是否空闲, 然后把判断结果发给处理中心。处理中心接收到给定范围内认知用户的判断, 采用AND算法: 即当且仅当所有的用户都检测到授权用户的信号时, 系统才会确认该频段正在被授权用户占用。假设有  $K$  个认知用户参与协作, AND算法下检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$  如下:

$$P_d = \prod_{i=1}^K P_{d,i} \quad i=1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$P_f = \prod_{i=1}^K P_{f,i} \quad i=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

从公式(7)和(8)可以看到, AND算法同时减低了系统的检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$ , 这就意味着更高的干扰冲突同时也有更高的频谱利用率。这里先给定一个授权用户能够容忍的干扰冲突界  $1 - P_d$ , 然后对于虚警概率  $P_f$  的优化作一些简单的分析。

假设需要的检测概率为  $P_d$ , 那么  $K$  个协作认知用户的平均检测概率:

$$\overline{P_{d,i}} = K \sqrt{P_d} \quad i=1, 2, \dots, K \quad (9)$$

由公式(9)和公式(5)可以得到第  $i$  个用户的判决门限:

$$\eta_i = \sqrt{\text{Var}(T_i/H_1)} Q^{-1}(\overline{P_{d,i}}) + E(T_i/H_1) \quad (10)$$

于是整个系统的虚警概率为:

$$P_f = \prod_{i=1}^K Q\left(\frac{\sqrt{\text{Var}(T_i/H_1)} Q^{-1}(\overline{P_{d,i}}) + E(T_i/H_1) - E(T_i/H_0)}{\sqrt{\text{Var}(T_i/H_0)}}\right) \quad (11)$$

由公式(8)可知, 参与协作认知的用户越多, 系统的虚警概率  $P_f$  越小。由公式(9)和指数函数性质可知,  $K$  越

大, 认知用户需要的平均检测概率  $\overline{P_{d,i}}$  也越大。又由公式(10)和  $Q(x)$  性质可知,  $\overline{P_{d,i}}$  越大判决门限  $\eta_i$  越小。而  $\eta_i$  越小, 该认知用户的虚警概率  $P_{f,i}$  越大。从这个意义上看, 随着认知用户的增加, 虚警概率不断恶化。因此, 存在一个最优的协作用户数  $K$ , 既能满足系统的检测概率界  $P_d$ , 又有最小的虚警概率  $P_f$ 。目前最优的协作用户数  $K$  一般通过计算机搜索得到。

上面的分析中假设了  $K$  个协作认知用户的平均检测概率  $\overline{P_{d,i}}$ , 在实际的系统中, 一般认为每个认知用户由于信道条件不一样, 因此检测概率  $P_{d,i}$  也不尽相同, 从而使对于最优协作用户数  $K$  的优化增加了难度。

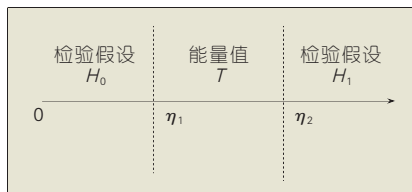
#### 2.1.2 OR算法

协作检测的OR算法基本类似AND算法, 差别在于: 只要有一个用户都检测到授权用户的信号时, 系统就会确认该频段正在被授权用户占用。OR算法下检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$  如下:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{d,i}) \quad i=1, 2, \dots, K \quad (12)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{f,i}) \quad i=1, 2, \dots, K \quad (13)$$

从公式(12)、(13)可以看到, OR算法提高了系统的检测概率  $P_d$ , 但同时也提高了虚警概率  $P_f$ 。同AND算法类似, 在检测概率  $P_d$  给定的情况下, OR算法的协作用户数  $K$  也存在一个最优值。事实上, 每引入一个新的协作认知用户, 由于采用了OR算法, 因此会提高虚警概率  $P_f$ 。同时, 在OR算法



▲图2 能量检测分区算法

下协作用户数 $K$ 的增大使得每个用户的检测概率 $P_{d,i}$ 可以减小,对应的每个用户的虚警概率 $P_{f,i}$ 会减小,系统的虚警概率 $P_f$ 也会减小。

### 2.1.3 计数算法

计数算法<sup>[4]</sup>是对AND算法和OR算法的改进,在计数算法中,处理中心接收到给定范围内认知用户的判断,采用计数算法,即当且仅当有一定数量的用户都检测到授权用户的信号时,系统才会确认该频段正在被授权用户占用。可以看到,AND算法和OR算法是计数算法的两个特例,前者要求的数量是 $K$ ,而后者要求的数量是1。

计数算法中,每个认知用户的判决准则如下:

$$R_i = \begin{cases} 0 & T \leq \eta_i \\ 1 & T \geq \eta_i \end{cases} \quad (14)$$

并且可以得到 $R_i$ 的离散分布:

$$R_i \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1-P_{f,i} & P_{d,i} \end{pmatrix} \quad H_0 \quad (15)$$

$$R_i \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1-P_{d,i} & P_{d,i} \end{pmatrix} \quad H_1$$

在处理中心,判决准则如下:

$$R = \begin{cases} 0 & \sum_{i=1}^K R_i \leq \beta \\ 1 & \sum_{i=1}^K R_i > \beta \end{cases} \quad (16)$$

分析一下系统的检测概率 $P_d$ 和虚警概率 $P_f$ 。假设每个认知用户之间彼此独立,利用中心极限定理, $\sum_{i=1}^K R_i$ 基本满足高斯分布,其均值和方差如下:

$$M = E\left(\sum_{i=1}^K R_i\right) = \sum_{i=1}^K E(R_i) = \begin{cases} \sum_{i=1}^K P_{f,i} & H_0 \\ \sum_{i=1}^K P_{d,i} & H_1 \end{cases} \quad (17)$$

$$V = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^K R_i\right) = E\left(\sum_{i=1}^K R_i\right)^2 - \left(E\left(\sum_{i=1}^K R_i\right)\right)^2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^K P_{f,i} - \sum_{i=1}^K P_{f,i}^2 & H_0 \\ \sum_{i=1}^K P_{d,i} - \sum_{i=1}^K P_{d,i}^2 & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

因此,系统的检测概率 $P_d$ 和虚警概率 $P_f$ 如下:

$$P_d = Q\left(\frac{\beta - M_{H_1}}{\sqrt{V_{H_1}}}\right) \quad (19)$$

$$P_f = Q\left(\frac{\beta - M_{H_0}}{\sqrt{V_{H_0}}}\right) \quad (20)$$

当给定了系统的检测概率 $P_d$ 后,可以计算出阈值 $\beta$ 和相应的虚警概率 $P_f$ ,前提是每个认知用户的检测概率和虚警概率已知。事实上,对公式(17)、(18)、(19)和(20)的联合优化,即在给定检测概率 $P_d$ 的条件下优化每个认知用户的参数从而得到最小的虚警概率 $P_f$ 是一个非常复杂的问题,目前一般通过计算机仿真方法给出优化结果。

### 2.2 软判决算法

在信道条件比较好的时候,认知用户硬判决可信度比较高,但是当检测到的信号能量值和阈值接近时,硬判决的误差就很明显,这时候需要引入软判决。软判决协作检测算法中,每一个认知用户的检测都采用软判决,检测结果可以是似然比值,也可以是能量值;然后把软判决结果发送到处理中心。

软判决协作检测算法常用的有分区算法、似然比算法、线性加权算法等<sup>[5-6]</sup>。此外,本文还提出了一种基于分布式无线通信系统(DWCS)的认

知无线电系统。

#### 2.2.1 分区算法

分区算法<sup>[7]</sup>是一种综合利用了硬判决和软判决的方法。如图2所示,分区算法中存在两个能量阈值 $\eta_1$ 和 $\eta_2$ (每个用户的阈值可以不一样),每个认知用户判决准则如下:

$$R = \begin{cases} 0 & T \leq \eta_1 \\ T & \eta_1 < T < \eta_2 \\ 1 & T \geq \eta_2 \end{cases} \quad (21)$$

每个认知用户把判决结果 $R_i$ 发送到处理中心,处理中心先把判决结果 $R_i$ 分类,硬判决(0或者1)可以采用上述的AND算法、OR算法或者计数算法,假设采用OR算法;对于软判决(能量值 $T_i$ ),处理中心的判决为:

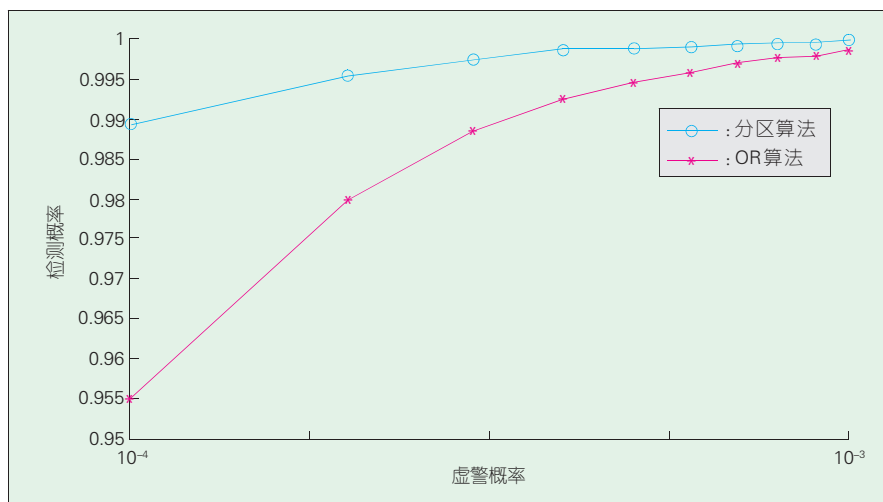
$$S = \begin{cases} 0 & \sum_{i=1}^M T_i \leq \eta_s \\ 1 & \sum_{i=1}^M T_i \geq \eta_s \end{cases} \quad (22)$$

这里假设 $K$ 个协作用户中的第1到第 $M$ 个用户提供软判决结果,同时引入了软判决阈值 $\eta_s$ 。由于 $\sum_{i=1}^M T_i$ 基本满足高斯分布,因此可以通过高斯概率密度分布函数计算 $S$ 的分布。

综上所述,分区算法的最终判决准则为:

$$R = \begin{cases} H_1 & S + \sum_{i=M+1}^K R_i \geq 1 \\ H_0 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

分区算法在信道条件好的认知



▲图3 分区算法与传统硬判决OR算法性能比较



用户中采用了硬判决,而在信道条件较差的认知用户中采用了软判决,图3的仿真结果表明,该方法相对于传统的硬判决OR算法能够有很好的性能改进。

### 2.2.2 似然比算法

似然比算法采用似然值作为检测的依据,是一种完全的软判决算法。理论研究和仿真结果表明,似然比检测是性能最优的检测方法,其缺点在于算法复杂度比较高。似然比检测过程中,每个认知用户检测当前频段的信号,把检测到的信号能量值转化为似然比,然后发送给处理中心;处理中心根据每个认知用户的似然比,采用一定的判决算法判断当前频段是否空闲。对于认知用户 $i$ ,检测到的信号能量 $T_i$ 转化为似然比:

$$\lambda_i = \frac{p_1(T_i)}{p_0(T_i)} \quad (24)$$

由信号能量 $T_i$ 满足高斯分布以及公式(3)、(4),可以得到:

$$p_1(T_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(2N\sigma^4 + 4\sigma^2P)}} e^{\frac{-(T_i - N\sigma^2 - P)^2}{2(2N\sigma^4 + 4\sigma^2P)}} \quad (25)$$

$$p_0(T_i) = \frac{1}{\sqrt{4\pi N\sigma^4}} e^{\frac{-(T_i - N\sigma^2)^2}{4N\sigma^4}} \quad (26)$$

在处理中心可以采用似然比乘积的方法联合检测:

$$R = \begin{cases} 0 & \prod_{i=1}^K \lambda_i \leq \eta \\ 1 & \prod_{i=1}^K \lambda_i > \eta \end{cases} \quad (27)$$

理想情况下阈值 $\eta$ 取1,实际应用阈值 $\eta$ 需要多次测量或仿真给出。对于某些特殊情况,个别用户的似然比会过大或者过小,从而影响联合检测的结果。针对这一问题,文献[8]提出一种改进的似然算法:

$$\lambda_i = \begin{cases} a & \frac{p_1(T_i)}{p_0(T_i)} \leq a \\ \frac{p_1(T_i)}{p_0(T_i)} & a < \frac{p_1(T_i)}{p_0(T_i)} < b \\ b & \frac{p_1(T_i)}{p_0(T_i)} \geq b \end{cases} \quad (28)$$

### 2.2.3 线性加权算法

线性加权算法也是一种软判决

算法,相对于似然比算法而言,线性加权算法能够以较小的性能损失显著的减低复杂度,因此逐渐成为认知无线电联合检测技术中的热点之一。下面简单介绍几种能量检测的线性加权算法。

在线性加权算法中,每一个认知用户首先检测当前频段上的信号能量 $T_i$ ,然后把 $T_i$ 直接发送给处理中心,处理中心在收到所有认知用户的信号能量后,作加权处理:

$$S = \sum_{i=1}^K T_i \omega_i \quad (29)$$

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$  为加权系数。

同样的利用中心极限定理可以知道加权后的能量值 $S$ 基本满足高斯分布,因此在计算出 $S$ 的均值和方差后,通过设定一个总的判断阈值 $\eta$ ,利用高斯分布概率函数就能得到检测概率 $P_d$ 和虚警概率 $P_f$ 。

线性加权算法的关键在于加权系数 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$ 的设定。目前常用的加权系数有:

(1) 均值加权

均值加权系数 $\omega_i = \frac{1}{K}, i=1, 2, \dots, K$ , 该线性加权方法类似于计数算法,差别在于计数算法中处理中心得到的是“0”或者“1”的二元判断信息,而均值加权中处理中心得到了认知用户的全部检测信息,因此均值加权性能明显要优于计数算法。

(2) 信噪比加权

考虑到认知用户信道条件的差异性,均值加权不是一个合理的加权方法。信噪比加权中,信道条件好的认知用户,即接收到检测信号信噪比高的用户,加权系数也高,公式如下:

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^K \gamma_i}, \quad i=1, 2, \dots, K$$

其中,  $\gamma_i = \frac{P_i}{\sigma_i^2}$  表示第 $i$ 个认知用户的接收信噪比

(3) 最优加权

求解最优加权系数 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$ 比较复杂,目前还没有一个明确的解析解。文献[9]给出了一个通过逐步搜索计算求解最优加权系数的方法,并通过仿真表明:最优线性加权的性能

基本接近似然比算法。此外文献[10]还给出了一种二次线性加权的最优线性加权算法。

需要指出的是,当认知用户的接收信噪比较低时,信噪比加权的性能基本接近最优加权。在实际系统中,由于认知用户一般离授权用户较远,满足接收信噪比低条件,因此通常采用信噪比加权。

### 2.2.4 DWCS算法

DWCS最早由清华大学无线中心提出<sup>[11]</sup>,目的在于通过分布式的网络架构来解决蜂窝通信中面临的一系列问题。在认知无线电系统中引入分布式无线通信系统的原因有两个:第一,在有中心的协作认知无线电中,不管是硬判决还是软判决,都需要从认知用户到处理中心的控制信道。硬判决的话只需要传“0”和“1”二元码,对控制信道的要求比较低;软判决需要传送软信息,因而对控制信道的要求比高。第二,在认知无线电系统中,由于认知用户需要检测的信号接收信噪比一般都比较低,因此要求作为终端的认知用户接收机具有非常高的灵敏度,这就造成了终端用户的成本比较高。采用分布式无线通信系统的架构能够很好的解决这两个问题。

分布式的认知无线电系统主要特征为:第一,系统有大量的分布式天线,这些分布式天线通过光纤连接到处理中心;第二,当前频谱的检测由分布式天线完成,分布式的天线把检测的结果发送给处理中心,处理中心可以采用硬判决,也可以采用软判决,一般倾向于采用软判决;第三,当处理中心检测到当前的频谱空闲时,通过分布式天线以广播的方式通知各天线范围内的认知用户可以使用该频段。

基于分布式的认知无线电系统很好地解决了控制信道和终端用户复杂的问题,同时在频谱检测过程中,系统可以采用上述的任何一种协

作方式,具有很大的潜在优势。由于光纤的信道条件远远优于原来认知用户到处理中心的无线信道,因此在检测性能上还能有更大的增益。在实际应用中,基于分布式的认知无线电系统可以很好地用于室内覆盖、局域网、突发通信等。关于分布式认知无线电系统的协作感知、数据融合以及资源分配等新课题的研究正在逐步展开。

### 3 结束语

近年来,认知无线电作为一种解决频谱资源短缺问题的新技术得到了人们的关注。频谱感知是认知无线电中极为重要的环节。本文介绍了认知无线电中频谱感知常用的能量检测算法,在此基础上介绍了AND算法、OR算法、计数算法、分区算法、似然比算法、线性加权算法和DWCS算法。这些协作检测算法能够改善系统的检测性能,降低干扰冲突,提高频谱利用率,因此在认知无线电系统中得到了广泛的应用。而这些协作检测算法涉及的优化算法以及如何降低算法复杂度的问题,还有待于进一步的深入研究。

### 4 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] TADAION A A. Notice of proposed rule making: unlicensed operation in the TV broadcast bands[R]. ET Docket, no 04-186. 2004.

[3] PEH E, LIANG Yingchang. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'07), Mar 11-15, 2007, Kowloon, China. New York, NY, USA: IEEE, 2007:27-32.

[4] AALO V, VISWANATHAN R. Asymptotic performance of a distributed detection system in correlated Gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40 (1): 211-213.

[5] COVE T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory[M]. New York, NY, USA: Wiley, 1991.

[6] UCHIYAMA H, UMEBAYASHI K, KAMIYA Y, et al. Study on cooperative sensing in cognitive radio based ad-hoc network[C]//Proceeding of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC' 07), Sep 3-7, 2007, Athens, Greece. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:1-5.

[7] ZHU Jiang; XU Zhengguang; WANG Furong, et al. Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom' 08), May 15-17, 2008, Singapore. 2008:1-5.

[8] BLUM R S, KASSAM S A, POOR H V. Distributed detection with multiple sensors: Part II Advanced topics[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1):64-79.

[9] QUAN Zhi, CUI Shuguang, SAYED A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1):28-40.

[10] UNNIKRISHNAN J, VEERAVALLI V V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 18-27.

[11] ZHOU Shidong, ZHAO Ming, XU Xibin, et al. Distributed wireless communication system:

a new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3):108-113.

[12] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05), Nov 8-11, 2005, Baltimore, MD, SA. Piscataway, J, USA: IEEE, 2005:137-143.

收稿日期: 2009-01-07

### 作者简介



王海军, 清华大学无线与移动通信研究中心在读博士研究生, 主要研究领域为软件无线电、认知无线电、协作通信和宽带无线接入。参加基金项目2项, 申请专利2项, 发表论文2篇。



梁欣, 清华大学无线与移动通信技术研究中心副主任、中国通信标准化协会无线通信技术工作委员会B3G工作组副组长、工业和信息化部IMT-Advanced推进组技术工作组组长。长期从事移动通信、软件无线电和宽带无线接入方面的科研工作。



王京, 清华大学无线与移动通信技术研究中心主任、清华信息科学与技术国家实验室副主任、中国通信学会无线及移动通信委员会委员。长期从事宽带无线传输技术和无线移动通信系统与网络等领域的研究工作。

### 中兴通讯建设塞内加尔GoTa国家安全网

2009年2月13日, 国家主席胡锦涛与塞内加尔总统瓦德在达喀尔举行会谈。中兴通讯凭借拥有自主知识产权的GoTa产品, 作为中塞合作项目的代表出席了会谈后的项目签字仪式, 瓦德总统就GoTa国家安全网的情况和意义向胡锦涛作了介绍。作为2006年中非合作论坛北京峰会后的重要科技成果, GoTa已经在加纳、塞内加尔和赞比亚等多个国家落地开花, 对巩固中非友谊作出了积极的贡献。

瓦德总统感谢中兴通讯帮助塞内加尔政府建设GoTa

国家安全网, 并表示今后愿与中兴通讯这样的跨国企业进行长久合作。侯为贵董事长表示中兴通讯将充分利用在加纳等政府安全网的建设经验, 把塞内加尔国家安全网工程做得更好, 早日为塞政府提供优质服务。

塞内加尔国家安全网项目一期共10万线, 覆盖全国省会城市、市县及城镇, 为移民局、警察、国家安全部门、消防、机要通信部门、边防、军队及国防部门提供独立安全的通信调度服务。GoTa网络提供了统一的数字调度管理平台, 破解了现有模拟网络的话音质量差、安全和保密性能低等难题。