

认知无线电中的协作频谱感知技术

聂慧锋¹, 徐声海²

(1. 中国船舶重工集团公司第七二三研究所, 江苏 扬州 225001;

2. 中国人民解放军海军装备部驻上海地区军事代表局驻扬州地区军事代表室, 江苏 扬州 225001)

摘要: 频谱资源匮乏是目前通信领域遇到的一个难题, 缓解频谱资源短缺的一个有效方法是频谱感知技术, 它可以实现频谱的动态利用, 提高频谱的利用率。首先介绍了能量检测法、匹配滤波检测法以及循环平稳特性检测法 3 种单用户谱感知技术, 然后研究了协作频谱感知技术的系统结构和感知模型, 最后基于能量检测法的协作频谱感知中的“K-N”融合准则进行仿真, 结果表明, 当 $K = \lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor$ 时, 协作频谱感知的性能达到最优。

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知; 检测概率; 虚警概率

中图分类号: TN929

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191315

中文引用格式: 聂慧锋, 徐声海. 认知无线电中的协作频谱感知技术[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 63-67, 73.

英文引用格式: Nie Huifeng, Xu Shenghai. The technology of cooperative spectrum sensing in cognitive radio[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 63-67, 73.

The technology of cooperative spectrum sensing in cognitive radio

Nie Huifeng¹, Xu Shenghai²

(1. The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China;

2. Military Representative Office of the PLA Navy Force in Yangzhou, Yangzhou 225001, China)

Abstract: The lack of spectrum resources is a difficult problem in the communication field. An effective method to alleviate the shortage of spectrum resources is spectrum sensing technology, which can realize the dynamic utilization of spectrum and improve the utilization of spectrum. Firstly, this paper introduces three single-user spectrum sensing techniques: energy detection method, matched filter detection method and cyclostationary characteristic detection method. Then, the system structure and perception model of cooperative spectrum sensing technology are studied. Finally, the cooperative spectrum sensing of the "K-N" fusion criterion based on energy detection method is simulated, the simulation results show that cooperative spectrum sensing performance is optimal when $K = \lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor$.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; detection probability; false detection probability

0 引言

无线电频谱资源是十分有限的, 授权用户(主用户)可以独享该授权频段, 而在主用户处于休眠状态时, 该授权频段处于空闲状态, 这样导致了频谱资源的浪费。频谱资源匮乏和授权频段利用率低下的矛盾日益突出, 认知无线电被认为是目前解决这一矛盾最有潜力的通信技术之一^[1]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)的概念是 MITOLA J 博士于 1999 年最早提出^[2], 其核心思想是通过感知周围环境中的可用频谱资源, 在对主用户不产生干扰的前提下使用该频谱, 以提高频谱利用率^[3]。实现对主用户通信不受影响, 在次用户接入前, 在此特定的时间和空间内对所在的频谱资源利用情况进行有效检测, 这就是频谱感知技术^[4]。

认知无线电频谱感知技术能够有效提高频谱利用

率、缓解频谱资源短缺的压力。自 CR 的概念被提出, 在理论和实际应用方面都取得了巨大的发展。其中具有代表性的是, 由美国国防高级研究计划署(DAPRA)资助的下一代无线通信(XG)项目主要研究系统方法和关键技术, 以实现基于认知无线电技术的动态频谱应用^[5]; 德国 Karlsruhe 大学的 JONDRAL F K 教授在文献[6]中提出了频谱池基本思想, 频谱共享池将一部分分配给不同业务的频谱合并成一个公共的频谱池。国内在认知无线电频谱检测技术方面也取得了显著的研究成果, 重庆大学的冯文江^[7]等人对加性高斯白噪声信道下能量检测法进行了研究, 并比较了能量检测法下认知用户单独检测、协作检测以及采用多样性技术来检测授权用户的性能; 文献[8]提出一种基于循环平稳检测的集中式协作频谱感知机制, 在保证感知能力的基础上有效降低系统

通信与网络 Communication and Network

的复杂度;文献[9]提出一种更精练的能量检测算法,该算法能避免瞬时信号能量下降造成的错误检测。

由于多径效应、阴影效应及信道衰减等因素对单认知用户的频谱感知的性能有较大的影响,导致频谱感知结果的可靠性差,为了克服这些问题,本文对多认知用户的协作频谱感知技术进行了研究,提出了一种快速选取 K 值的方法。

1 单用户频谱感知

单用户频谱感知是单个认知用户进行频谱感知,其单用户判决结果即为最终的判决结果,单用户频谱感知方法主要包括能量检测法、匹配滤波器检测法和循环平稳检测法。

能量检测法是通过感知周围环境中的电磁谱的能量,应用门限比较法来检测信号是否存在,若感知到的电磁谱能量高于门限,则说明授权用户在线;否则,授权用户处于空闲状态。能量检测法是一种盲检测算法,不需要预先知道信号的任何先验信息,只要求取信号的能量,其计算过程简单,算法容易实现,在认知无线电频谱感知技术中得到了广泛的应用。能量检测法的实现结构原理框图如图 1 所示,认知用户对接收到的信号进行采样,得到数字信号;为了能够快速计算信号的能量,进行傅里叶(FFT)变换,将时域信号变换到频域,对频域信号取模求平方,即可得到信号的能量;最后将获取到的信号能量与设定的门限比较,判决授权用户是否存在。

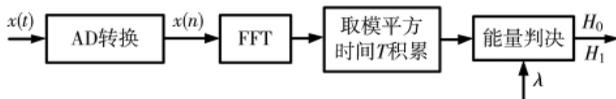


图 1 能量检测法原理图

匹配滤波器检测法是一种相干检测,其检测原理是在输入信噪比一定的情况下,使输出功率信噪比最大的最佳线性滤波器^[10]。理论上匹配滤波器检测法是最优的检测器,对于特定的信号有最佳的检测性能,但是匹配滤波器必须知道信号的先验信息,在认知无线电系统中,授权用户的信息具有多变性,很难预先掌握授权用户的先验信息,使得匹配滤波器检测法的应用受到限制。

通常在通信系统中的通信信号都进行了人工调制,在信号特征上呈现出周期性的变化,利用通信信号的这一特征提出了循环平稳检测法。循环平稳检测法是通过分析信号频谱的相关性以识别出信号和噪声,该方法的计算量较大,但能识别出调制方式。

以上介绍了 3 种常用的频谱感知的基本检测方法,每种频谱感知方法都有其优缺点,实际应用中对于不同的频谱环境、不同种类的授权用户,应选择合适的频谱感知方法。在无法获得授权用户的先验信息的情况下,能量检测感知方法是最优的感知算法,其实现简单,可靠性好。3 种频谱感知方法之间优缺点的比较如表 1 所示。

表 1 单用户频谱感知方法比较

序号	频谱感知方案	优点	缺点
1	能量检测法	实现简单,算法复杂度低,不需要信号的先验信息	对噪声不确定性敏感,检测时间长,不适合弱信号的检测
2	匹配滤波器法	处理增益高,检测性能佳,检测时间短	必须知道授权用户的详细先验信息,运算复杂度高,灵活性差
3	循环检测法	检测灵敏度高,可区分信号和噪声,能识别信号的调制方式	计算量大,检测时间长

2 协作频谱感知

单用户频谱感知虽能快速检测到主用户是否在线,但只以一个认知用户的检测结果作为最终检测结果,可信度不高,因为单个认知用户容易受到周围环境的影响,由障碍物造成的反射和遮挡容易对检测结果造成误判,所以只以单个认知用户的判决结果作为最终的判决结果,将会影响频谱感知的性能。为了解决这个问题,提升频谱感知的性能,可通过多个认知用户协作进行频谱感知。协作频谱感知的实质是通过分集增益来增强感知结果的可靠性和有效性,多个认知用户工作在同一个认知无线网络中,对各认知用户的感知结果进行融合,互相协作以完成对频谱的检测。

2.1 协作频谱感知系统结构

协作频谱感知的一般流程如下:各个认知用户分别进行本地频谱感知,将感知结果发送给融合中心;融合中心收集各个认知用户的感知结果,采用一定的融合准则对接收到的感知结果进行综合处理,做出最终的判决,并将判决结果传输给各个认知用户。融合中心根据收到的信息不同分为“软”融合和“硬”融合两种,若融合中心收到的信息只包括认知用户的检测结果,则为“硬”融合;若融合中心收到的信息是认知用户的检测数据(信噪比、能量等),则为“软”融合。“硬”融合的规则主要有“OR”融合准则、“AND”融合准则和“K-N”融合准则 3 种类型^[11]。“K-N”融合准则是一种介于“OR”融合准则与“AND”融合准则之间的融合算法,当 $K=1$ 时,“K-N”融合准则就变为“OR”融合准则;当 $K=N$ 时,“K-N”融合准则就是“AND”融合准则。本文主要研究了基于能量检测法的多个认知用户协作频谱感知的“K-N”融合技术,根据认知用户的总数量,寻找最佳的 K 值,以使得融合性能最优。多个认知用户协作频谱感知的系统结构框图如图 2 所示。

2.2 协作频谱感知模型

协作频谱感知是指多个认知用户协同合作进行频谱感知的技术,相对于单用户频谱感知,协作频谱感知在检测性能方面更具有优势。“K-N”融合是集中式的协作频谱检测方法,因此需要设置融合中心进行数据融合^[12]。根据协作频谱感知的原理建立协作频谱感知模型,假设

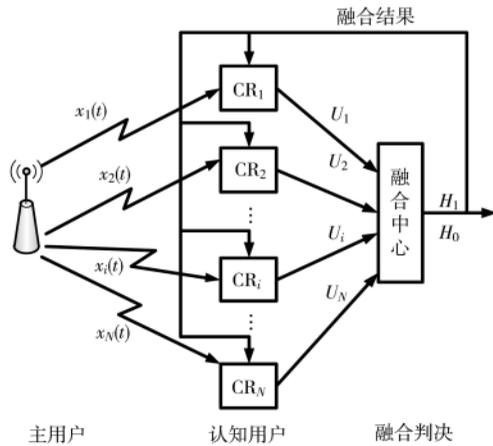


图2 协作频谱感知系统结构框图

认知用户检测到主用户在线时判决为“1”，未检测到主用户在线时判决为“0”。

若共有 N 个认知用户参与协作频谱感知，其感知结果可以表示成下式：

$$\begin{cases} H_0: x_i(k) = n_i(k), & i=1, 2, \dots, N \\ H_1: x_i(k) = h_i(k) \cdot s(k) + n_i(k), & i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中， H_0 表示主用户不存在， H_1 表示主用户存在； $x_i(k)$ 和 $n_i(k)$ 分别表示第 i 个认知用户 CR_i 在 k 时刻的接收信号和加性噪声； $s(k)$ 表示授权用户在 k 时刻的发送信号； $h_i(k)$ 表示 CR_i 与授权用户在 k 时刻信道增益。

各认知用户采用能量检测算法进行本地检测，噪声是均值为零、方差为 σ_i^2 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)，则各认知用户检测到的能量统计量为：

$$U_i = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M x_i^2(k) \quad (2)$$

式中， U_i 表示本地检测能量的统计量， M 表示检测的时间窗长度。

根据中心极限定理推导不同假设下检测统计量的分别情况为：

$$\begin{cases} H_0: n \sim \text{Normal}(M\sigma_i^2, 2M\sigma_i^2) \\ H_1: n \sim \text{Normal}(M\sigma_i^2 + NP_s, 2M\sigma_i^2 + 4N\sigma_i^2 P_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中， σ_i^2 为高斯白噪声方差， P_s 表示信号功率。

根据衡量频谱感知性能的概率公式，可知在协作感知的协作网络中， CR_i 的检测概率和虚警概率分别为：

$$P_{di} = P(U_i > \lambda_i | H_1) = Q\left(\frac{\lambda_i - M\sigma_i^2 - MP_s}{\sqrt{(2M\sigma_i^2 + 4MP_s)\sigma_i}}\right) \quad (4)$$

$$P_{fi} = P(U_i > \lambda_i | H_0) = Q\left(\frac{\lambda_i - M\sigma_i^2}{\sqrt{2M}\sigma_i}\right) \quad (5)$$

式中， $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ， λ_i 表示 CR_i 的检测门限，

P_{di} 、 P_{fi} 分别为 CR_i 的检测概率和虚警概率。

假设对同一个认知无线网络中进行频谱感知的认知用户数为 N 个，第 i 个认知用户的检测概率和虚警概率分别为 P_{di} 和 P_{fi} ，则利用“AND”融合准则进行协作频谱感知的检测概率 P_{d_and} 和虚警概率 P_{f_and} 如式(6)所示。

$$\begin{cases} P_{d_and} = \prod_{i=1}^N P_{di} \\ P_{f_and} = \prod_{i=1}^N P_{fi} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明“AND”融合的结果是，系统的检测概率要小于任何一个单用户的检测概率，同时系统的虚警概率也可以有效降低。

利用“OR”融合准则进行协作频谱感知的检测概率 P_{d_or} 和虚警概率 P_{f_or} 如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{d_or} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{di}) \\ P_{f_or} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明“OR”融合的结果是，系统的检测概率要大于任何一个单用户的检测概率，缺点是系统的虚警概率也会随之增加。

融合中心采用“K-N”融合准则进行综合处理时，对每个认知用户送过来的判决结果进行统计归类，当有大于或等于 K ($1 \leq K \leq N$) 个认知用户判决结果为“1”时，最终融合判决为“1”，说明授权频段存在主用户信号；否则判决为“0”，授权频段处于空闲状态。假设利用“K-N”融合准则进行协作频谱感知的总的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 如式(8)、式(9)所示。

$$P_d = P(H_1: \sum_{i=1}^N D_i \geq k) = \sum_{j=k}^N \binom{N}{j} \prod_{i \in \Phi} P_{di} \prod_{i \notin \Phi} (1 - P_{di}) \quad (8)$$

$$P_f = P(H_0: \sum_{i=1}^N D_i \geq k) = \sum_{j=k}^N \binom{N}{j} \prod_{i \in \Phi} P_{fi} \prod_{i \notin \Phi} (1 - P_{fi}) \quad (9)$$

式中， D_i 表示认知用户本地判决结果， Φ 表示认知用户判决授权用户存在时所在的集合， j 表示集合 Φ 中元素的个数。

由式(8)、式(9)可以看出，“K-N”融合准则中，当 K 的取值不同，整个系统的感知性能也会有所差异。当有 N 个认知用户时，通过多次仿真分析，比较不同 K ($K=1, 2, 3, \dots, N$) 取值下的检测性能，找出最佳的检测性能所对应的 K 值。

3 仿真与验证

3.1 协作频谱感知算法流程

本文对基于能量检测的协作频谱感知中的“K-N”融合算法进行了研究，从 N 个总认知用户中，找出最优的 K 值，使协作频谱感知性能最佳，其算法流程如下：

(1) 初始化协作频谱感知认知用户的感知环境(认知用户数(user)、信噪比(SNR)、蒙特卡洛试验次数(count)、

通信与网络 Communication and Network

检测门限(λ)、检测时间(M);

(2)各认知用户进行频谱采集,并进行基于能量检测的本地频谱感知;

(3)各认知用户将本地频谱感知结果送至融合中心进行融合判决;

(4)融合中心收到认知用户的频谱感知结果,进行分集处理,采用“K-N”融合准则进行融合判断,作出最终判决结果,并计算 K 分别取 1、2、3、...、 N 时的检测概率和虚警概率;

(5)比较 K 分别取 1、2、3、...、 N 时的检测性能,找出使检测性能最优的 K 值;

基于能量检测协作频谱感知的“K-N”融合算法伪代码如下:

```
Function CoopSpecSensing( )
InitSensingEnvironment( );
for ii= 1:1:count;
    各认知用户分别进行频谱采集;
    for u=1:1:user;
        根据式(2)计算能量统计量( $U_i$ );
        设置判决规则 if  $U_i > \lambda$ ;
             $D_i = H_1$ ;
        else  $U_i < \lambda$ ;
             $D_i = H_0$ ;
    end
end
```

各认知用户将认知结果送至融合中心,应用“K-N”融合准则进行融合判决,并作出最终判决;

根据式(8)、式(9)分别计算检测概率 P_d 和虚警概率 P_f ;

比较 K 分别取 1、2、3、...、 N 时的检测性能,找出使检测性能最优的 K 值;

}

接收机工作特性(ROC)曲线是描述接收机工作时虚警概率 P_f 和检测概率 P_d 关系的重要曲线,它可以很好地反映接收机检测信号的可靠度,本文通过绘制 ROC 曲线来观测协作频谱感知检测性能的变化趋势和特点。

3.2 5 用户“AND”、“OR”融合实例仿真

本文以本地能量检测法为基础进行仿真,仿真环境:PC 为 Inter Core i7 2.4 GHz CPU、8 GB 内存,仿真软件为 MATLAB R2014a。

仿真了 5 用户采用“AND”、“OR”融合准则协作频谱感知并与单用户频谱感知进行比较,验证基于能量检测的频谱感知的基本特性、协作频谱感知和非协作频谱感知的感知性能,本地认知用户采用 5 000 次蒙特卡洛试验,信噪比为 -4 dB,其具体的仿真参数如表 2 所示。

仿真结果如图 3 所示,从图中可以看出,随着虚警概率不断增大,检测概率不断提高,虚警概率小于 0.1 时,“OR”融合准则的频谱感知的检测概率小于“AND”融合准则;在虚警概率大于 0.1 时,“OR”融合准则的频谱感

表 2 “AND”、“OR”融合仿真试验参数

参数名称	取值
认知用户数	5
信噪比/dB	-4
蒙特卡洛试验次数	5 000
检测门限	60~215
检测时间/ms	1
噪声信号	均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声
仿真信号	正弦信号(带宽:60 kHz, f_c : 120 kHz)

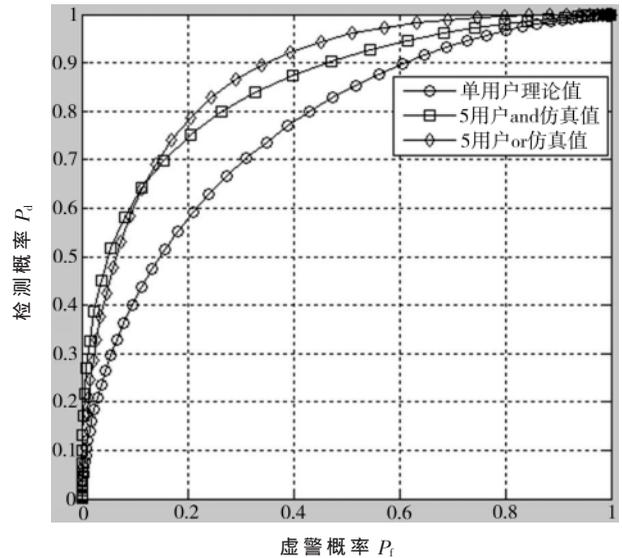


图 3 5 用户“AND”、“OR”融合 ROC 曲线

知的检测概率大于“AND”融合准则;在虚警率一定时,5 认知用户协作的“OR”融合准则和“AND”融合准则下的检测概率高于单用户频谱感知的检测概率,说明协作频谱感知的感知性能优于非协作频谱感知。

3.3 5 用户“K-N”融合实例仿真

5 个认知用户采用“K-N”融合准则协作频谱感知仿真相关参数如表 3 所示,其仿真结果如图 4 所示。

表 3 5 个认知用户“K-N”融合仿真试验参数

参数名称	取值
认知用户数	5
信噪比/dB	-4
蒙特卡洛试验次数	5 000
检测门限	60~215
检测时间/ms	1
噪声信号	均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声
仿真信号	正弦信号(带宽:60 kHz, f_c : 120 kHz)

从图 4 的仿真结果可以看出,采用“K-N”融合准则, K 分别取 1、2、3、4、5 时的 ROC 曲线每条曲线的变化趋势都符合能量检测的 ROC 曲线的变化特性,在虚警概率一定的条件下,任何 K 值下的协作频谱感知的检测概率都比单用户进行频谱检测的检测概率大。当

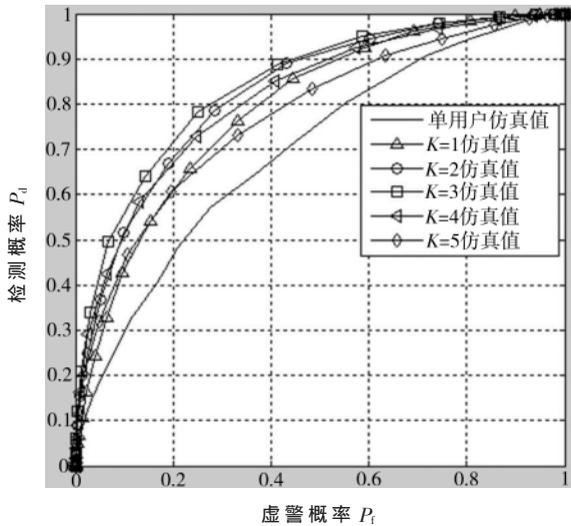


图4 5个认知用户ROC曲线

$K=1$ 和 $K=5$ 时, 曲线分别与图3中的“OR”准则和“AND”准则的ROC曲线重合, $K=1$ 和 $K=5$ 的ROC曲线相交于一点, $K=2$ 和 $K=4$ 的ROC曲线相交于一点, 这一特性与基于“ $K-N$ ”融合准则的协作频谱感知的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 公式(式(8)、式(9))是相符的。当 $K=3$ 时, 5个认知用户的协作频谱感知的性能最佳, 即 $K=N/2+1$ 时, 感知性能最佳。

3.4 8用户“ $K-N$ ”融合实例仿真

8个认知用户采用“ $K-N$ ”融合准则协作频谱感知仿真相关参数如表4所示, 其仿真结果如图5所示。

表4 8个认知用户“ $K-N$ ”融合仿真试验参数

参数名称	取值
认知用户数	8
信噪比/dB	-4
蒙特卡洛试验次数	5 000
检测门限	60~215
检测时间/ms	1
噪声信号	均值为0、方差为1的高斯白噪声
仿真信号	正弦信号(带宽: 60 kHz, f_c : 120 kHz)

当认知用户数量增加到8时, 采用“ $K-N$ ”融合准则, K 分别取1、2、3、...、8时, 讨论协作频谱感知的性能, 从图5可知, 无论 $K(1 \leq K \leq 8)$ 的取值如何, 其ROC曲线的变化规律都符合能量检测ROC曲线特征, 且与基于“ $K-N$ ”融合准则的协作频谱感知的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 公式(式(8)、式(9))是相符的。当 $K=4$ 时, 8个认知用户的协作频谱感知性能最佳, 即当 $K=N/2$ 时, 感知性能最优。比较图4和图5可知, 在相同信噪比和一定的虚警概率的情况下, 图5的检测概率比图4大, 即认知用户数越多, 其频谱感知性能越好。

本文除了对认知用户数为5和8的情况进行了仿真以外, 还对不同信噪比下不同认知用户数的协作频谱

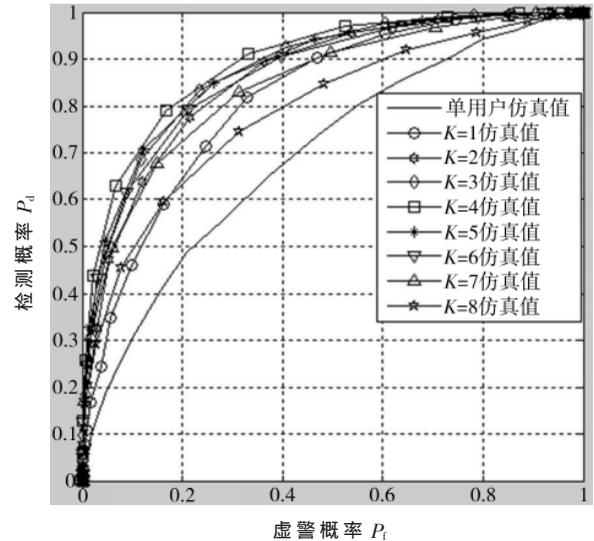


图5 8个认知用户ROC曲线

感知进行了仿真, 仿真结果表明, 采用“ $K-N$ ”融合准则下的协作频谱感知, 当 $K = \lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor$ 时, 协作频谱感知性能最优。信噪比和认知用户数对协作频谱感知的性能也有影响, 相同认知用户数和虚警概率一定的情况下, 信噪比越大, 协作频谱感知性能越好; 在相同信噪比和一定的虚警概率的情况下, 认知用户数越多, 协作频谱感知性能越好。

4 结论

本文针对认知无线电中的协作频谱感知技术进行了研究, 提出了一种“ $K-N$ ”融合准则的协作频谱感知的最优 K 值的选取方法, 当认知用户总数为 N 、 $K = \lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor$ 时, 协作频谱感知性能最优。该方法能够快速选取出最优的 K 值, 使协作频谱感知性能最优, 本文以5个和8个认知用户总数的“ $K-N$ ”融合准则的协作频谱感知为例, 通过仿真验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] HAYKIN S, THOMSOM D J, REED J H. Spectrum sensing for cognitive radio[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 849-877.
- [2] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. Personal Communications, IEEE, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] 邓见光, 袁华强, 张剑. 认知无线网络频谱感知与节点协同问题综述[J]. 电子设计工程, 2011, 19(24): 82-86.
- [4] 章磊, 黄光明. 基于可信度的认知无线电协同频谱检测[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2519-2521.
- [5] NOTOR J. Cognitive radio emerges from obscurity[C]. BWRC Cognitive Radio Workshop, 2004.
- [6] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling: an innovative

(下转第73页)

计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

surveillance system[J].International Conference on Communication and Signal Processing, 2019, 19(4-6):0157-0160.

[16] SENGAR S S, MUKHOPADHYAY S. Moving object detection based on frame difference and W4[J]. Signal Image and Video Processing, 2017, 11(7): 1357-1364.

[17] Zhang Yi, Yin Liang. The environment of autonomous navigation of unmanned vehicle technology in figure[J]. Journal of Ordnance, 2014, 35(1): 32-37.

[18] 张洁, 赵红东, 李宇海, 等. 复杂背景下车型识别分类器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 166-173.

[19] Ren Shaoqing, He Kaiming, GIRSHICK R. et al. Faster

(上接第 62 页)

ground[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(5): 869-872.

[11] NELATURI S, SARMA N, NOOKALA V, et al. A compact microstrip patch antenna based on metamaterials for Wi-Fi and WiMAX applications[J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2018, 18(3): 182-187.

[12] AN W, LI Y, FU H, et al. Low-profile and wideband microstrip antenna with stable gain for 5G wireless applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(4): 621-624.

[13] XU K, DA X, HAN L, et al. Microstrip patch antenna with multiple parasitic patches and shorting vias for bandwidth enhancement[J]. IEEE Access, 2018, 6: 11624-11633.

[14] 王崇惜, 邓淑英. 一种 X 波段余割平方赋形平面微带阵列天线[J]. 通信技术, 2019, 52(9): 2310-2316.

[15] ELLIS M, ZHAO Z, WU J, et al. A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(4): 1552-1555.

[16] JIANG Z H, WERNER D H. A compact, wideband circularly polarized co-designed filtering antenna and its application for wearable devices with low SAR[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(9):

(上接第 67 页)

strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 4(3): 8-14.

[7] 冯文江, 郭瑜, 胡志远. 认知无线电中的频谱感知技术[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(11): 46-49.

[8] 孙鹏, 杨富程, 宋杰, 等. 基于循环平稳检测的协作频谱感知[J]. 电子测试, 2019(4): 12-14.

[9] 甘国妹, 郑金存, 甘永进. 基于能量检测的频谱感知算法性能研究[J]. 科技创新与应用, 2019(3): 25-27.

[10] TURIN G L. Minimax strategies for matched-filter detection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 23(11):

R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1147.

(收稿日期: 2019-10-18)

作者简介:

马秀(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电路与系统。

谭福奎(1966-), 男, 本科, 正高级实验师, 主要研究方向: 电路与系统、人工智能。

李良荣(1963-), 通信作者, 男, 本科, 教授, 主要研究方向: 电路与系统、电磁场与微波技术。

3808-3818.

[17] GYASI K O, WEN G J, INSERRA D, et al. A compact broadband cross-shaped circularly polarized planar monopole antenna with a ground plane extension[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(2): 335-338.

[18] QU L, PIAO H, QU Y, et al. Circularly polarized MIMO ground radiation antennas for wearable devices[J]. Electronics Letters, 2018, 54(4): 189-190.

[19] 李勋. X 波段宽带微带阵列天线设计[J]. 无线通信技术, 2016, 25(1): 41-45, 49.

[20] 郝欣欣, 张怀武, 刘小飞. 64 单元 X 波段 LTCC 高增益圆极化微带阵列天线[J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 130-133.

[21] 郝欣欣, 段耀铎, 徐海东, 等. 64 单元 X 波段高增益圆极化微带阵列天线设计[J]. 微波学报, 2014, 30(5): 31-34.

[22] 朱丹. X 波段 32 元高增益阵列天线设计与仿真[J]. 硅谷, 2014, 7(6): 27-29.

(收稿日期: 2019-10-23)

作者简介:

金宇婷(1991-), 通信作者, 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 卫星数据传输系统设计。

邢斯瑞(1987-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向: 卫星通信系统设计。

孙伟(1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 卫星通信系统设计。

1370-1371.

[11] 丰金花. 基于最小贝叶斯风险的频谱感知技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.

[12] 王再励. 认知无线网络中的协作频谱检测技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.

(收稿日期: 2019-12-02)

作者简介:

聂慧锋(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 信号与信息处理、电子对抗。

徐声海(1987-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 雷达、电子对抗。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所