

A Novel Cooperative Sensing Algorithm Based on Combination of Soft Decision and Hard Decision

LIU Xiao-bing¹, LIU Li-tian², WANG Shuang¹

1. Company of Postgraduate Management, institute of Command & Technology of Equipment, Beijing, China, 101416

2. Department of Information Equipment, institute of Command & Technology of Equipment, Beijing, China, 101416

E-mail: xiao_soldier@sina.com

Abstract: Cognitive Radio (CR) technology is being recognized as an efficient method in dealing with the scarce spectrum resources, the spectrum detection is one of the important steps in CR, and the cooperative spectrum detection is popular because of its good detection ability. Based on a brief analysis and contrast of the “soft decision” and “hard decision” algorithms, the double threshold spectrum sensing algorithm was proposed in this paper which can ensure the detection precision, and reduce the measurement of transmitted data meanwhile. Theory analysis and simulation results show that the novel algorithm can enhance the detection probability and reduce the detection time.

Key words: Cognitive Radio; cooperative detection; soft decision; hard decision; double threshold

基于“软、硬判决”融合的协作检测算法改进

刘小兵¹, 刘力天², 王爽¹

1. 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京, 中国, 101416

2. 装备指挥技术学院信息装备系, 北京, 中国, 101416

E-mail: xiao_soldier@sina.com

【摘要】: 认知无线电技术被认为是解决频谱资源紧缺的有效方法, 频谱检测是其重要的环节, 而协作检测由于其良好的检测性能日益受到人们的关注。本文在简要分析比较了协作检测的“软判决”和“硬判决”算法基础上, 提出了一种双门限频谱检测算法, 它既能保证检测效果的准确性, 又能降低传输数据量, 是对两种算法很好的折衷。理论分析及仿真结果表明, 改进算法能有效提高检测概率和减少检测时间。

【关键词】: 认知无线电; 协作检测; 软判决; 硬判决; 双门限

1. 引言

随着各种现代化无线电通讯手段和用频设备的迅猛发展, 电磁频谱充斥着整个时域、频域、空域和能量域, 空间中的电磁环境越来越复杂, 人们对频谱资源的需求越来越大。然而美国联邦通信管理委员会 (FCC) 调查表明, 不同地区的平均频谱占用率只达到 13.1%^[1]。这说明面对无线电频率资源的稀缺与频谱利用率低的现状, 迫切需要一种新型的通讯模式来提高无线电频率的使用效率。Mitola 博士于 1999 年提出的认知无线电 (Cognitive Radio, 简称 CR) 概念^[2]被认为是解决此问题的有效方法, CR 技术是一种智能的频谱共享技术, 它通过感知频域、时域和空域等多维空间的频谱环境, 自动搜寻并利用已授权频段的空闲频谱。从原理上来讲, 其能从根本上解决频谱干扰、利

用率低的问题。

认知无线电的几个关键技术是: 频谱检测、功率控制、频谱管理。CR 用户对频谱的准确、快速检测是 CR 技术得以推广和应用的前提, 同时也是其核心问题。目前, 对于频谱检测算法研究已取得了一些成果, 就单节点检测而言, 由于信道多径衰落和阴影衰落严重影响了单节点频谱检测的性能, 增加了检测结果的不确定性, 甚至会引起隐蔽终端问题。因此, 我们需要通过多节点协作检测的方法来应对上述问题。协作检测是通过汇集各个节点的检测结果, 进而通过一定的融合算法进行判决得出结论。主要的融合算法有“硬判决”和“软判决”, 各类文献对这两类算法研究较多, 但它们都存在各自的不足。本文就针对这两种判决算法的不足进行改进, 从而提高协同检测效率。

2. “硬、软判决” 算法分析

总体来说, 协作频谱检测算法分为集中式数据融合和分布式数据融合。目前, 主流研究方向关注于集中式协同方式, 其主要融合算法有“硬判决” 算法和“软判决” 算法。下图为集中式数据融合原理图。

2.1 硬判决

本地节点通过单节点检测, 将信号是否存在的 1 比特信息传送到融合中心进行联合判决, 我们将这种类型叫做本地判决结果的融合, 也称硬判决。主要判决规则有“与” 规则、“或” 规则和“K 秩” 规则。

2.1.1 “与” 规则

“与” 融合准则^[3]就是按照逻辑“与” 的方式进行数据融合。当所有本地节点经过独立检测都认为待测频段内授权用户信号存在时, 中心节点才认为信号是存在的。假设每个本地节点的检测概率和虚警概率分别为 P_{D_i} 和 P_{F_i} , 则经过“与” 规则判决后, 中心节点最终的全局判决的检测概率 P_{D_i} 和虚警概率 P_{F_i} 分别为:

$$P_{AND_F} = \prod_{i=1}^N P_{F_i} \quad (1)$$

$$P_{AND_D} = \prod_{i=1}^N P_{D_i} \quad (2)$$

2.1.2 “或” 规则

“或” 融合准则^[4]就是按照逻辑“或” 的方式进行数据融合。只要任一认知节点检测出授权用户信号存在, 则中心节点就判决信号是存在的。假设每个本地节点的检测概率和虚警概率分别为 P_{D_i} 和 P_{F_i} , 则经过“或” 规则判决后, 中心节点最终的全局判决的检测概率 P_{D_i} 和虚警概率 P_{F_i} 分别为:

$$P_{OR_D} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{D_i}) \quad (3)$$

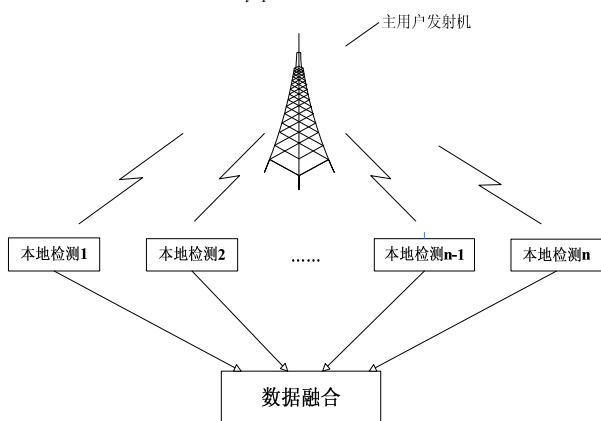


Figure 1. Sketch map of centralized cooperative detection
图 1. 集中式协作检测示意图

$$P_{OR_F} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{F_i}) \quad (4)$$

2.1.3 “K 秩” 规则

“K 秩” 准则^[5]是“与”、“或” 准则的推广, 它可以简单描述为: 当 N 个感知节点中有大于 K 个节点判断信号存在时, 中心节点就判决信号是存在的, 否则判决信号是不存在。

$$\begin{cases} H_1: \sum_{i=1}^N D_i \geq K \\ H_0: \sum_{i=1}^N D_i < K \end{cases} \quad (5)$$

它是“与” 准则和“或” 准则的更一般的表示形式, 当 $K = 1$ 时, “K 秩” 准则退化为“或” 准则; 当 $K = N$ 时, “K 秩” 准则退化为“与” 准则。

2.2 软判决

本地节点传送的是本地检测到的数据统计量, 而非单节点检测到的判决结果, 我们把这种类型叫做本地检测数据的融合, 称为软判决。主要算法有似然比检测算法、基于信噪比的加权算法和基于信任度的加权算法等。下面简要分析一下后文将要用到的似然比检测算法^[6]原理。

我们需要寻求一种在满足虚警概率 $P(H_1 / H_0) = \alpha$ 的约束条件下使检测概率 $P(H_1 / H_1)$ 最大的准则。基于似然比的纽曼-皮尔逊(Neyman-Pearson criterion), 简称 N-P 准则^[7], 正好满足这样的要求。

针对二元假设检验, n 个检测器分别对目标独立观测得出统计检测量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。融合中心采用 N-P 准则决策对本地检测量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行融合得到最终的判决结果。

首先, 根据各个节点传送来的检测量 x_i 可以得到概率密度函数 $p(x / H_0)$ 和 $p(x / H_1)$, 构建似然比检验判决式:

$$\lambda(x) = \frac{p(x / H_1)}{p(x / H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \mu \quad (6)$$

两边取自然对数, 并进行化简, 得到检测统计量的判决式:

$$l(x) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \gamma(\mu) \quad (7)$$

求出检测统计量 $l(x)$ 的概率密度函数 $p(l / H_0)$ 和 $p(x / H_1)$, 根据虚警概率的约束条件,

$$p(H_1 / H_0) = \int_{\gamma(\eta)}^{\infty} p(l / H_0) dl = \alpha \quad (8)$$

可以求得检测门限 $\gamma(\eta)$, 进而依据可以求得检测概率:

$$p(H_1 / H_1) = \int_{\gamma(\eta)}^{\infty} p(l / H_1) dl \quad (9)$$

3. 改进算法——双门限检测算法

由于“硬判决”规则传送给融合中心的信息量较少，检测性能受到限制；“软判决”规则花费的通信开销较大，实时性较差，对此本文提出一种软硬结合的改进算法——双门限检测算法，对两种算法的优点进行了充分融合利用。

3.1 理论分析

首先本地检测运用能量检测法^[8]进行检测，得出初步判决结果，然后将待融合检测量发送到融合中心，利用“软判决”的似然比检验进行判决，最后利用“硬判决”的“或”规则^[4]将前两步的判决结果进行最后的融合，得到检测结果。在本地检测中，我们选用两个门限，如下图所示：

首先确定两个虚警概率 P_{fm0} 和 P_{fm1} ，依据式 (8)，由恒虚警概率可以确定两个门限 γ_{th0} 和 γ_{th1} 。可以归纳出统计量 Y_i 的判决式：

$$Y_i = \begin{cases} 0 & Y_i < \gamma_{th0} \\ T(Y_i) & \gamma_{th0} \leq Y_i < \gamma_{th1} \\ 1 & Y_i > \gamma_{th1} \end{cases} \quad (10)$$

当 $Y_i < \gamma_{th0}$ 时判为 H_0 ，向融合中心发送 0；

当 $Y_i > \gamma_{th1}$ 时判为 H_1 ，向融合中心发送 1；

当 $\gamma_{th0} \leq Y_i < \gamma_{th1}$ 时，向融合中心发送统计量 Y_i 。

设第 $i(i=1,2,\dots,k)$ 个认知用户的检测概率和虚警概率分别用 P_{di} 和 P_{fi} 表示，有本地检测可以得到为：

$$P_{di} = P_r(T(y) > \gamma_{th1} | H_1) = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\gamma_{th1}}) \quad (11)$$

$$P_{fi} = P_r(T(y) > \gamma_{th1} | H_0) = \frac{\Gamma(m, \gamma_{th1}/2)}{\Gamma(m)} \quad (12)$$

将融合数据传送到中心节点，运用软判决的“似然比检测”规则，可以得到：

$$P_{dm} = p(H_1 / H_1) = \int_{\gamma(\eta)}^{\infty} p(l / H_1) dl \quad (13)$$

$$P_{fm1} = p(H_1 / H_0) = \int_{\gamma(\eta)}^{\infty} p(l / H_0) dl = \alpha \quad (14)$$

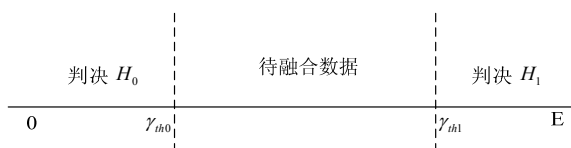


Figure 2. sketch map of double threshold detecte algorithm
图 2 双门限检测算法示意图

最后，运用硬判决的“或”规则，可以得到全局检测概率和虚警概率为：

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{D_i}) \bullet (1 - P_{dm})^{N-K} \quad (15)$$

$$P_F = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{F_i}) \bullet (1 - P_{fm1})^{N-K} \quad (16)$$

算法步骤：

1) 各本地认知用户通过能量检测法对统计检测量 Y_i 进行判决，可得到两种结果：一种是判决和结果，一种是待融合得的检测量；

2) 将 K 个认知用户取得的判决结果传送到融合中心，将 $N-K$ 个检测统计量的采样数据送至中心进行似然比规则判决；

3) 融合中心根据认知用户的判决信息和第二步得到的判决结果进行硬判决，采用“或”规则判决得出最后结论。

此算法在软判决和硬判决之间做了折衷，既能有效传递单节点检测信息，又能减少通信开销。

3.2 仿真结果

下面，通过仿真实验说明软硬判决的双门限检测算法较于基于似然比规则的融合算法和硬判决的“或”规则的检测性能有所提高。

考虑由 N 个认知用户组成的无线网络，每个用户相互独立的进行频谱检测，以 BPSK 信号的检测为例：假设源信号为 BPSK 信号，其码元速率为 100Hz，载波频率为 250Hz，采样频率为 1KHz，虚警概率 $P_{fm1}=0.1$ ，高斯白噪声方差为 1，通过改变信号幅度来改变信噪比，蒙特卡罗仿真 1000 次。

如图，在预先设定的恒虚警概率条件下，比较了在不同的 SNR 值下这几种算法的检测概率。由图可以看

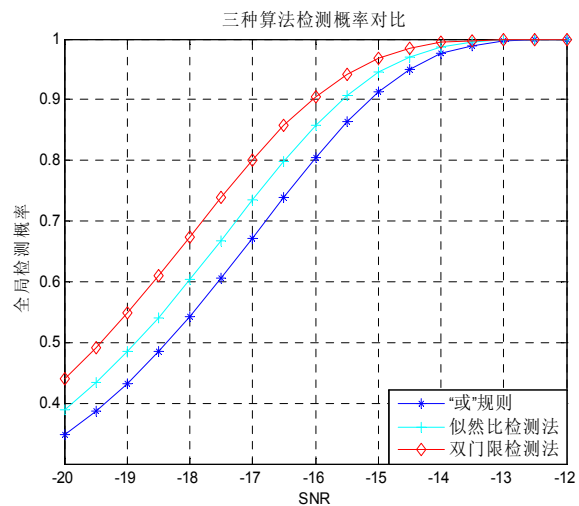


Figure 3. Curve:contrast of detect algorithm performance
图 3 检测算法性能对比曲线

出,随着 SNR 值的增加,各种检测算法的检测概率都有明显的提高,在 SNR 达到一定值之后,各种检测算法的检测概率都达到了理想状态,但是在本文提出的检测算法在信噪比较低时其检测概率明显要高于“似然比检测”算法和“或”规则合并算法,检测性能有了显著的提高。

4. 结语

由于信道的多径衰落、阴影效应以及隐藏终端等问题,单节点感知很难达到系统要求的性能,为此联合位于不同位置的多节点联合检测是提高检测效率的有效手段。研究较多的为“硬判决”规则和“软判决”规则,然而这两种算法都有其各自的不足。“硬判决”规则传递给融合中心的信息量较少,检测性能受到限制;“软判决”规则花费的通信开销较大,实时性较差。对此情况,本文提出了“硬、软判决”融合算法——双门限检测法,既能保证检测效果的准确性,又能降低传输数据量,是对两种算法很好的折衷。仿真验证,改进的“硬、软判决”融合算法——双门限检测法能有效的提高检测概率,获得较好的检测效能。

致谢

感谢装备指挥技术学院信息装备系通信工程教研室李长青老师在本文写作其间所给予的指导和帮助。

References (参考文献)

- [1] FCC. Spectrume Plicy Task Force Report. ET Docket NO. 02-155,NOV 02,2002.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire: Cognitive radios: making software radios more personal. IEEE Personal Communications. 1999. 6(4).
- [3] C. Sun, W. Zhang, K. B. Letaief. Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radios under Bandwidth Constraints[C].Proc IEEE WCNC 2007, 2007.
- [4] C. Sun, W. Zhang, K. B. Letaief. Cluster-Based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems[C]. Proc IEEE ICC 2007, 2007.
- [5] Visser F E, Janssen G J M, Pawelczak P. Multimode spectrum sensing based on energy detection for dynamic spectrum access [J].IEEE Radio Communication Magazine. 2007,42(3).
- [6] H. L. Van Trees, Detection, estimation and modulation theory... part 1. detection estimation, and linear modulation theory:Wiley New York, 1968.
- [7] Zhao Shujie,Zhao Jianxun.Signal detection and estimate theory.Beijing: Tsinghua university press, 2005, 11.
赵树杰、赵建勋. 信号检测与估计理论. 北京: 清华大学出版社,2005, 11.
- [8] H. Urkowitz. Energy detection of unknown deterministic signalsm[J]. Proc. IEEE,Volume 55,Issue 4,Apr.1967:523-531.