

Soft Decision for Cognitive Radio Cooperative Spectrum Sensing

ZHANG Ji-liang¹, WANG Yang², ZHANG Qin-yu³

Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055 China

1.e-mail: zhangjiliang3000@163.com, 2.e-mail: wangyang@hitsz.edu.cn, 3.e-mail: zqy@hitsz.edu.cn

Abstract: In distributed cognitive radio systems, the bandwidth for reporting sensing information is limited by the uncertainty of the control channel. To get better performance when control channel is constrained, soft decision (SD) detector is used to sense spectrum hole. The simulation results show that, in some conditions, performance of SD detector with 2~3-bit qualification can be as good as that of optimal likelihood detector.

Keywords: Cognitive Radio; Spectrum Sensing; Cooperation Detection; Qualification

软判决法在认知无线电合作频谱感知中的应用

张继良, 汪洋, 张钦宇

哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055

1.E-mail: zhangjiliang3000@163.com, 2.E-mail: wangyang@hitsz.edu.cn, 3.E-mail: zqy@hitsz.edu.cn

【摘要】在多用户认知无线电系统中, 针对认知无线电用户合作频谱感知中联合检测性能的提高与控制信道带宽受限的矛盾, 本文引入软判决检测的方法进行联合检测并利用仿真的方法对其与似然比检测器和“K”秩法检测器性能进行比较。结果表明, 对观测向量 2~3 比特量化即可使检测器性能接近似然比检测器。

【关键词】 认知无线电; 频谱感知; 联合检测; 量化

1. 引言:

无线服务和设备如移动通信、公共安全、电视广播等的出现, 许多频段已经被分配给授权用户, 然而FCC的报告指出无论是收入富裕的城市地区, 还是乡村偏远地区, 其授权频谱资源均没有得到充分的利用^[1]。这显然加剧了对日趋紧张的频谱资源的浪费。采用机会频谱接入的认知无线电技术^{[1][2][3]}被认为是提高无线频谱利用率的最佳方案。

由于二级用户(SU)必须能够随时感知一级用户(PU)是否存在从而避免对 PU 造成干扰, 频谱感知是认知无线电的重要环节^[4]。单节点频谱感知可以采用匹配滤波器检测法、能量检测法、循环特征检测法、基于干扰温度的检测法等方法^{[3][6]}。但是, 由于传统的单节点检测无法解决由于阴影衰落和隐藏终端带来的问题, 文献[4]~[5]采用联合检测的方法对频谱进行感知。联合检测需要各个 SU 节点利用单节点检测的方法各自完成对 PU 的检测后将信息传送到判决中心(FC), FC 根据上述检测信息得到信道是否被 PU 占用的结论, 显然, 联合检测需要一条控制信道传递各个节点的感知信息。然而, 由于认知用户本身的非授权性, 控制信道的存在性、带宽、信道质量等往往具有不确定性, 因此认知无线电中需要重点分析如何降低对控制信道的依赖性^[4]。如果每个节点都把观测值直接发送至

FC, 利用似然比准则进行判决, 虽然能够得到最优的检测性能, 但是将需占用较大的控制信道容量。“K”秩法^[7](Counting Rule 或 Volting Rule)将本地检测判决结果发送到 FC 进行判决, 虽然能够有效的降低在控制信道中传输的数据量(每节点只发送 1 比特信息), 从而降低对控制信道容量的要求, 但是这种方法的检测性能较差。文献[8]在无线传感器网络(WSN)领域, 提出了将量化的观测向量发送至 FC 进行综合判决的软判决(SD)检测器, 这种检测器权衡了检测性能的提高与控制信道受限的矛盾。值得注意的是, 在设计认知无线电系统的 SD 检测器时, 如果各个 SU 节点采用能量检测法, 因此其观测向量与采用传感器的 WSN 将有不同的统计特性。

本文针对检测性能的提高与控制信道容量受限的矛盾, 结合认知无线电的特殊性, 将 SD 检测的方法引入频谱感知, 分析了该方法与似然比检测器和“K”秩法检测器的性能以及对控制信道容量要求的差异。

2. 联合检测

在认知无线电中, 联合检测可以抽象为二元假设检验问题

$$\begin{cases} H_0: \text{主用户没有占用该频段} \\ H_1: \text{该频段已被主用户占用} \end{cases} \quad (1)$$

资助信息: 国家自然科学基金重点项目(60432040)
The National Natural Science Foundation of China (60432040)

2.1 模型和条件

软判决检测法的拓扑结构如图 1:

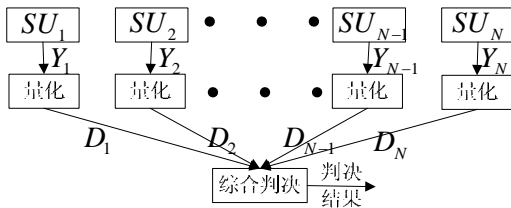


图 1 软判决检测法的拓扑结构

与 WSN 不同, 频谱感知中 Y_i 是第 i 个二级用户 SU_i 检测器通过单点检测的方法得到的观测值而不是通过传感器得到的信息。在进行软判决时, 各个 SU_i 将 Y_i 量化, 得到量化后的观测信息 D_i , 然后将 D_i 发送至 FC 进行综合判决。在传递信息过程中, 可以根据控制信道的情况调整量化的位数, 进而调整对控制信道容量的要求。

当主用户信号形式未知时, 最优单节点检测器为能量检测器^[6]。因各个 SU 有一定的距离, 可以认为它们得到的信号是相互独立的, 而由于 SU 离 PU 相对较远, 各个 SU 接收到的 PU 信号具有相同的统计特性。因此在得到最优综合判决准则时, 本文采用如下条件:

- 1) 各个 SU 采用能量检测器^[7]对 PU 进行检测;
- 2) 各个节点得到的信号不相关并且有相同的统计特性;
- 3) 各个节点的判决门限设置是相同的;
- 4) Y 的分布与量化门限对于 FC 是已知的, 即 D 的分布对于 FC 是已知的
- 5) 噪声是方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN)
- 6) 控制信道容量平均分配给各个 SU

每个 SU 在 PU 出现 (H_1) 和 PU 没有出现 (H_0) 时接收到的信号分别为

$$\begin{cases} H_1 : s_i[2n] = a_i[2n] + n_i[2n] \\ H_0 : s_i[2n] = n_i[2n] \end{cases} \quad (2)$$

其中 a_i 为 PU 信号, $2n$ 为每次感知的采样次数。根据奈奎斯特采样定理, $n \geq TW$, 其中 T 为一次检测持续时间, W 为信道带宽。独立高斯分布的平方和

服从 CHI 方分布。根据假设 2, $Y_i = \frac{\sum_{j=1}^{2n} s_i[j]^2}{\sigma^2}$ 服从独立同分布:

$$\begin{cases} H_0 : Y_i \sim \chi_{2n}^2 \\ H_1 : Y_i \sim \chi_{2n}^2(\eta_i) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\eta_i = a_i^2 / \sigma^2 = E_s / N_0$, 即信噪比 SNR。根据中心极限定理, 当 $n \geq 6$ 时, Y_i 近似服从正态分布:

$$\begin{cases} H_0 : Y_i \sim N(2n, 4n) \\ H_1 : Y_i \sim N(2n + \eta_i, 4n + \eta_i) \end{cases} \quad (4)$$

令 $\mu_0 \square 2n\sigma^2$, $\mu_1 \square \mu_0 + \eta_i$, 则:

$$\begin{cases} H_0 : Y_i \sim N(\mu_0, 2\mu_0) \\ H_1 : Y_i \sim N(\mu_1, \mu_1 + \mu_0) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 软判决

在认知无线电中, SU 采用机会频谱接入的方式, 因此控制信道的容量往往受限。根据山农定理, 在控制信道中的信息速率 $V \leq C = 2B \log(1 + P / N_0 B)$ 。其中 C 为控制信道的信道容量, B 为控制信道的带宽, $P / N_0 B$ 为信噪比。这样的话, 对每个能量检测器得到的信息量化后的位数 M 不得超过 VT / Nn , 其中 T 为一次检测持续时间, N 为传感器的个数, n 为各节点检测信道的总数。这样, 对于单个 SU_i 而言, 若可以量化 M 位, 量化后的信息有 $L = 2^M$ 种可能。此后各个节点将量化后的 M 位信息 D 发送至 FC 进行综合判决。假定 SU 量化门限 $t[L+1] = [t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_L]$, 其中 $t_0 = -\infty$, $t_L = +\infty$ 。则有:

$$D_i = \begin{cases} 0 \dots \dots t_0 < Y_i \leq t_1 \\ 1 \dots \dots t_1 < Y_i \leq t_2 \\ \vdots \\ L-2 \dots t_{L-2} < Y_i \leq t_{L-1} \\ L-1 \dots t_{L-1} < Y_i < t_L \end{cases} \quad (6)$$

根据 H_0 , H_1 两种情况下 Y_i 的分布, 可得 D_i 的分布:

$$\begin{cases} H_0 : P(D_i = j) = Q\left(\frac{t_j - \mu_0}{\sigma_0}\right) - Q\left(\frac{t_{j+1} - \mu_0}{\sigma_0}\right) \\ H_1 : P(D_i = j) = Q\left(\frac{t_j - \mu_1}{\sigma_1}\right) - Q\left(\frac{t_{j+1} - \mu_1}{\sigma_1}\right) \end{cases} \quad (7)$$

由此可得 FC 对于量化后信息的对数似然比检测的统计量:

$$\begin{aligned} T(D) &= \ln \frac{P(D; H_1)}{P(D; H_0)} = \ln \frac{\prod_{i=0}^N P(D_i; H_1)}{\prod_{i=0}^N P(D_i; H_0)} \\ &= \sum_{i=1}^N \ln \left[\frac{Q\left(\frac{t_{D_i} - \mu_1}{\sigma_1}\right) - Q\left(\frac{t_{D_i+1} - \mu_1}{\sigma_1}\right)}{Q\left(\frac{t_{D_i} - \mu_0}{\sigma_0}\right) - Q\left(\frac{t_{D_i+1} - \mu_0}{\sigma_0}\right)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

令：

$$L(D_i) = \ln \frac{\left(Q\left(\frac{t_{D_i} - \mu_1}{\sigma_1}\right) - Q\left(\frac{t_{D_{i+1}} - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right)}{\left(Q\left(\frac{t_{D_i} - \mu_0}{\sigma_0}\right) - Q\left(\frac{t_{D_{i+1}} - \mu_0}{\sigma_0}\right) \right)}$$

则判决统计量

$$T(\mathbf{D}) = \sum_{i=1}^N L(D_i) \quad (9)$$

将 $T(\mathbf{D})$ 与门限 γ 比较，即可得到 SD 检测的结果。

3. 仿真实验

假设 POI 为干扰概率，即 H_1 情况下检测器判决 H_0 的概率； POD 为频谱空洞检测概率，即 H_0 情况下检测器判决 H_0 的概率。为了考察量化位数对 SD 检测器性能的影响，我们通过数值的方法得到 SD 检测器的工作特性曲线。我们使用的仿真条件为 $n=10$ ， $\eta_i=7$ ， $N=9$ ，并在此条件下对 \mathbf{Y} 进行 2 位和 3 位的量化。在这里，我们设置 2 位量化的量化门限为 $t[5]=[-\infty, 20, 23.5, 27, +\infty]$ ，设置 3 位量化的量化门限为 $t[9]=[-\infty, 18, 20, 22, 23.5, 25, 27, 29, +\infty]$ 。仿真在 matlab7.0 的环境下进行。因为 PU 是授权用户，为了使 PU 愿意与 SU 共享频谱，检测器的 POI 必须很小。因此在考察这两种方法的性能时，我们只关注工作特性曲线中 $POI < 0.02$ 的部分。显然，在 POI 给定的前提下， POD 越大的检测器，其检测性能越好。通过数值方法得到的工作特性曲线如图 2：

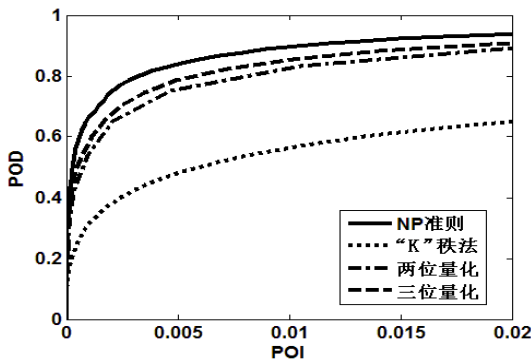


图 2 工作特性曲线

由工作特性曲线可知，量化 2 位的 SD 检测器性能已经明显好于“K”秩法，而量化到 3 位的 SD 检测器性能已经与似然比检测器十分接近。在这种情况下，如果对工作性能没有特别的要求，在控制信道允许的前提下，量化 2~3 位的 SD 检测器就已经达到很好的性能。另外，进一步优化量化门限 t 还可能使 SD 检测器的性能变得更好。

4. 结论

在各个节点信息服从独立同分布的前提下，似然比检测器是最优检测器，是联合检测性能的上限，但是每个 SU 节点需要在其控制信道发送一个完整的数值；基于本地判决结果的“K”秩法检测器，每个 SU 节点仅需向控制信道发送 1 比特本地检测结果，但其性能不如似然比检测器。针对这一矛盾，本文引入了软判决检测法，有效地解决了检测性能的提高与控制信道带宽受限的矛盾。在相应的仿真条件下，2~3 比特量化即可使检测器性能逼近性能最优的似然比检测器。

References (参考文献)

- [1] Federal Communications Commission, "Spectrum Policy Task Force," [R] Rep. ET Docket no. 02-135, Nov. 2002.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal," [J] IEEE Personal Communications, vol. 6, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," [J] IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 23, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [4] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," [A] in Proc. of Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove[C], CA, USA, Nov. 7-10, 2004, pp. 772 - 776.
- [5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," [A] in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C], Baltimore, USA, Nov. 8-11, 2005, pp. 131-136.
- [6] Zhi Quan, Shuguang Cui and Sayed, A.H. "An Optimal Strategy for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks" [C] Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE 26-30 Nov. 2007 Page(s):2947 - 2951
- [7] V. Aalo and R. Viswanathan, "Asymptotic performance of a distributed detection system in correlated Gaussian noise"[J], IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 211-213, 1992.
- [8] Niu, Ruixin; Varshney, Pramod K. "Joint Detection and Localization in Sensor Networks Based on Local Decisions" [A], Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC '06. Fortieth Asilomar Conference[C] on Oct.-Nov. 2006 Page(s):525 - 529