

文章编号:1000-582X(2012)04-112-05

双门限相对距离加权协同频谱感知算法

冯文江¹, 孟器宇^{1,2}, 秦春玲¹, 宋麟¹

(1. 重庆大学通信工程学院 重庆 400044; 2. 中国人民解放军 66489 部队, 北京大学 100095)

摘要:针对单节点能量检测法存在的“隐藏终端”和检测准确性低以及协同频谱感知法大多采用等权重进行数据融合,未考虑不同节点所处的通信环境对检测性能的影响等问题,提出一种加权协同频谱感知算法。该算法以双门限能量检测法为基础,依据单节点双门限设置与节点感知性能之间的关系,以单节点双门限的相对距离作为信任度进行加权协同数据融合。仿真结果表明,与单节点双门限能量检测法和“或”准则协同频谱感知法比较,该算法在低信噪比环境,仍能获得可靠的检测性能。

关键词:认知无线电; 能量检测; 双门限; 协同频谱感知

中图分类号: TN911

文献标志码: A

A cooperative spectrum sensing algorithm with double-threshold relative distance weighting

FENG Wen-jiang¹, MENG Qi-yu^{1,2}, QIN Chun-ling¹, SONG Lin¹(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Unit No. 66489 of PLA, Beijing 100095, P. R. China)

Abstract: The single-node energy detection has the drawbacks of low accuracy and “Hidden terminal”, while the cooperative spectrum sensing algorithms usually use equivalent weights for data fusion instead of considering the influences to the detection performance resulting from the communication environment of different nodes. In order to solve these problems, a novel weighted cooperative spectrum sensing algorithm is proposed. The proposed algorithm is based on the double-threshold energy detection. According to the relation between the single-node dual-threshold setting and the node perceiving performance, the single-node dual-threshold relative distance is used as a credit for weighted cooperative data fusion. The simulation result proves that, compared with the single node double-threshold energy detection and the cooperative spectrum sensing algorithm based on OR-rule, the proposed algorithm can achieve reliable sensing performance with low SNR.

Key words: cognitive radio; energy detection; double-threshold; cooperative spectrum sensing

无线通信需求的快速增长和频谱资源的匮乏,激发了人们对认知无线电(cognitive radio, CR)技术的广泛关注和深入研究。作为一种新的智能无线通

信技术,认知无线电欲求突破传统的静态(固定)频谱分配政策,通过实时监视和检测目标频段,发现暂时未被主用户(授权用户)使用的频段,在对主用户

收稿日期:2011-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872038);国家“211工程”创新人才培养计划资助项目(S-09102)

作者简介:冯文江(1963-),男,重庆大学博士生导师,主要从事宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等方向研究,(Tel)15123317141;(E-mail)fwj@ccee.cqu.edu.cn。

不造成任何干扰的前提下,第二用户(非授权用户或认知用户)可以“伺机”接入这些空闲频谱。而一旦发现主用户重新出现在该频段上,认知用户必须及时退出该频段,保证主用户通信的正常和可靠。利用这种二次频谱利用机制,可以有效提高频谱利用率,为无线通信的进一步发展提供更宽阔的频谱资源空间^[1]。

认知无线电应用必须解决 3 个基本问题^[2-3]: 频谱感知、动态频谱分配和发送功率控制。对于认知无线电系统而言,频谱感知既要保证认知用户有机会利用主用户暂时没有使用的频谱来实现通信,又要确保不会对主用户通信造成干扰。为此,频谱感知必须保证高的可靠性和实时性,具体体现为能够在低信噪比、强干扰下可靠地检测到主用户信号和其它认知用户信号的存在与否,甚至还应对不同用户进行信号识别以更好地掌握频谱占用情况。现有的频谱感知算法大都基于“信号检测”理论,如能量检测法^[4]无需信号的先验信息,实现简单,但易受环境噪声影响;匹配滤波检测法^[5]能使接收信号的信噪比最大化,感知实时性较好,但是需要知道检测信号的先验知识,如调制方式、时序、脉冲波形、封装格式等;基于循环平稳特性的信号检测算法^[6-7]具有较高的信号辨识能力,检测精度较高,且不易受外界噪声的影响,但是算法复杂度较高,实时性较差。

能量检测法作为频谱感知的经典算法之一,其基本原理是对接收信号经过带通滤波后进行模数转换,再经过累积平方运算求得接收信号的能量估值,能量估值与门限值对比做出判决^[8-9]。针对传统的能量检测法判决门限难以准确选择的缺点,双门限能量检测算法受到了广泛关注^[10]。此外由于认知用户所处环境不同以及无线信道的多径衰落、阴影效应以及隐藏终端等问题,造成了单认知用户检测可靠性较低。为了改善这些缺点,文献^[11-14]提出多节点协同频谱感知方法,其中文献^[12]分析了在瑞利衰落信道中协同感知的检测性能,文献^[14]提出了中心节点基于信噪比来进行融合的协作感知方法。但已有的协同频谱感知方法,如“与”“或”协作方式,大多假定参与协同的用户具有相同的平均信噪比,以等权重进行数据融合。然而,在实际工作环境中,单个认知用户局部判决的可靠性是不同的,因此采用等权重协同检测并非最优处理^[15]。基于此,

笔者提出一种加权协同频谱感知算法,以双门限能量检测法为基础,以单节点双门限的相对距离作为信任度权重进行加权协同数据融合。仿真结果表明,该方法能有效提高频谱检测性能。

1 双门限能量检测法

传统的能量检测法原理简单,算法运算量较小,感知的实时性较好,但在未知噪声功率或者噪声功率时变的情况下,该算法会由于噪声功率波动而使得检测结果可靠性降低。其主要原因在于判决门限的设定依赖于噪声功率,当噪声功率变化时,在原噪声条件下设置的旧门限不再适用,此时必须及时调整门限,否则能量检测法将极易做出错误的判决,导致频谱感知失败。对此,理想的解决方案是把门限设为动态的,门限的大小实时地伴随着外部噪声变化,但是在实际频谱感知场景中,无法准确获得在某一时刻噪声的变化特性,门限设定很难做到动态。为此,文献^[10-16]提出双门限的能量检测频谱感知算法,如图 1 所示。

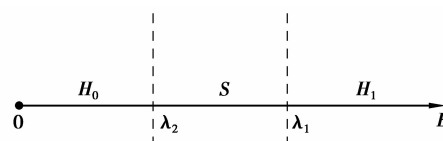


图 1 双门限能量检测

双门限能量检测法通过设置 2 个大小不同的门限 λ_1 和 λ_2 来划分接收信号能量大小,以此判决授权用户信号是否存在。当 $E > \lambda_1$ 时,判决信号存在,而 $E < \lambda_2$ 时,信号不存在, $\lambda_1 > \lambda_2$ 。而当接收信号能量在 $\lambda_2 < E < \lambda_1$ 时,此时信号的观测值和门限相差不大,这就意味着利用接收信号样本来进行简单的能量检测判决是不可靠的,定义该区域为不可靠区,用 $S = \lambda_1 - \lambda_2$ 来表征。在不可靠区内,需要等待进一步检测来判决信号是否存在,在本文的协同感知中,对不可靠区的检测留给中心节点处理,也就是单个感知节点将接收信号能量值直接发送至融合中心,由融合中心集中判决。单节点频谱感知流程和处理框图如图 2 所示。

文献^[16]给出了一种基于双门限的能量检测算法处理流程

Step 1: 单节点局部感知判决。每个感知节点 i ($i=1, 2, \dots, N$) 独立进行频谱感知,接收到主用户

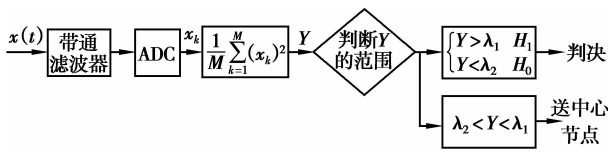


图 2 基于双门限的能量检测

频带内信号的能量值为 Y_i 。设 $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}$ 为感知用户 i 的 2 个门限值。当 $\lambda_{i2} < Y_i < \lambda_{i1}$ 时, 节点 i 向融合中心发送接收信号能量值 Y_i , 具体发送数据分别为

$$R_i = \begin{cases} Y_i, & \lambda_{i2} < Y_i < \lambda_{i1}; \\ L_i, & \text{其它}, \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$L_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq Y_i < \lambda_{i2}; \\ 1, & Y_i > \lambda_{i1}. \end{cases} \quad (2)$$

Step 2: 融合中心感知判决。假设 N 个感知节点中有 K 个节点进行了局部判决, 即接收到信号能量值满足式(2), 剩下的 $N-K$ 个节点向融合中心发送了它们的能量检测值, 将此过程称为二次感知判决。融合中心根据 $N-K$ 个能量值进行二次感知如下

$$D = \begin{cases} 0, & 0 \leq \sum_{i=1}^{N-K} Y_i \leq \lambda; \\ 1, & \sum_{i=1}^{N-K} Y_i > \lambda, \end{cases} \quad (3)$$

其中, λ 是融合中心根据合适的虚警概率确定的门限值, 此时中心节点相当于一个拥有大量数据的单节点。

文献[16]假定所有单节点 2 个门限设置相同。事实上, 由于各个节点所处环境不同, 为了提高单个节点感知性能, 对不同认知节点应根据实际应用场景及性能要求, 设置不同的双门限值。

2 单节点双门限设置

采用双门限能量检测进行频谱感知的目的是为了提高判决的准确性, 尽量减少由于噪声波动的影响。正是因为环境噪声的影响, 当 $\lambda_{i2} < Y_i < \lambda_{i1}$ 时, 放弃判决。同理, 之所以在接收信号能量满足 $Y_i > \lambda_{i1}$ 或 $Y_i < \lambda_{i2}$ 时能直接进行判决, 是因为在这种情况下噪声干扰不足以影响判决的准确性。这样就给如何设置门限 λ_{i1} 和 λ_{i2} 提供了一个思路。在特定无线环境中, 噪声功率的大小是随机变化的, 但是通过对

噪声功率进行统计分析, 可以大致确定噪声功率大小的范围, 即可以大致确定噪声方差 δ_n^2 满足

$$E_{n-\min} \leq \delta_n^2 \leq E_{n-\max}, \quad (4)$$

提出一种新的双门限设置方法, 由于门限设置取决于噪声方差或者信噪比, 设置门限 λ_1 和 λ_2 对应的环境噪声方差分别为 δ_{n1}^2 和 δ_{n2}^2 , 且满足

$$b_1 E_{n-\min} \leq \delta_{n1}^2 \leq b_2 E_{n-\max}; \quad (5)$$

$$e_1 E_{n-\min} \leq \delta_{n2}^2 \leq e_2 E_{n-\max}, \quad (6)$$

其中 $b_1 \geq 1, 0 < b_2 \leq 1, e_1 \geq 1, 0 < e_2 \leq 1$ 。

分析图 1 可知, $\delta_{n1}^2 > \delta_{n2}^2$ 。这是因为, 从直观上分析, 假定接收信号能量为 E_s , 只有当 $E_s + \delta_{n1}^2 > E_{n-\max}$ 才能确切地判定信号存在, 而不担心判决错误。当 E_s 很小时, δ_{n1}^2 接近于 $E_{n-\max}$ 。同理, 只有当 δ_{n2}^2 接近于 $E_{n-\min}$ 时, 才能确切地判定信号不存在, 因此, 在双门限能量检测算法中, 较大门限对应的环境噪声较大。将式(5)、(6)合并

$$c_1 E_{n-\min} \leq \delta_{n2}^2 \leq \delta_{n1}^2 \leq c_2 E_{n-\max}, \quad (7)$$

其中, $c_1 \geq 1, 0 < c_2 \leq 1$ 。适当选择 c_1, c_2 的大小, 就可以得到不同的 δ_{n1}^2 和 δ_{n2}^2 值。

在实际应用中, 根据单个认知用户所需要的检测可靠性来确定不可靠区 S 的大小。单个认知用户只有在区域 S 外才对接收信号能量做判决, 进一步假设中心节点的判决是准确的。因此由图 2 可以分析得到, 如果 λ_1 增大, λ_2 减小, 则 S 增大, 需要进一步通过中心节点判决的机会就增多, 感知的准确性提升, 但是缺点是中心节点所要处理的数据量增加, 平均处理时间相对延长。由式(7)可得, 合理选择 c_1, c_2 , 就等于选择了 S 的大小, 也就等于选择了单个认知用户独立检测的可靠性。

3 信任度权重因子的设置

在协同频谱感知中, 多节点协作能改善频谱感知的性能。基于信任度权重的协同感知比传统的等权重协同感知具有更好的频谱检测性能。

不可靠区 S 的大小决定了单个认知节点进行二次感知的机会, 而二次感知比一次感知具有更可靠的检测性能。显然, 二次感知的次数越多, 单个节点的感知时间越长, 感知结果越可靠。因此, 直观上可以得到这样的结论, 不可靠区 S 大的单节点比不可靠区 S 小的单节点感知的可靠性要高。设置 $S = \lambda_1 - \lambda_2$, 直接用 2 个门限之间的距离来表征单个节点的感知准确性。

参与协同感知的第 i 个用户双门限距离为 $d_i = \lambda_{i1} - \lambda_{i2}$, 且 $\lambda_{i1} > \lambda_{i2}$, $i = 1, 2, \dots, N$, 由于不同节点门限大小的数量级有可能不同, 用双门限相对距离作为衡量区域 S 大小的标准, 即单节点双门限的距离因子 d_i 定义为

$$d_i = \frac{\lambda_{i1} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1}}, \quad (8)$$

其中, $0 < d_i < 1$. 设置基于双门限相对距离的权重因子 $w_{d,i}$,

$$w_{d,i} = d_i / \sum_{i=1}^N d_i, \quad (9)$$

对于不同认知用户, 信任度权重因子 $w_{d,i}$ 的取值范围为 $(0 \sim 1)$.

4 算法仿真及性能分析

以信任度为权重进行感知数据融合, 比传统的等权重数据融合更能接近实际应用场景, 检测结果也更为准确。因此, 当得到协同感知进行数据融合的权重 $W_{a,i}$ 后, 就很容易得到系统最终的虚警概率和检测概率

$$P_{fa}^c = 1 - \prod_{i=1}^N w_{d,i} (1 - P_{fa,i}), \quad (10)$$

$$P_d^c = 1 - \prod_{i=1}^N w_{d,i} (1 - P_{d,i}), \quad (11)$$

其中: $P_{fa,i}$, $P_{d,i}$ 分别表示第 i 个认知用户实施频谱检测的虚警概率和检测概率(如图 3 所示)。

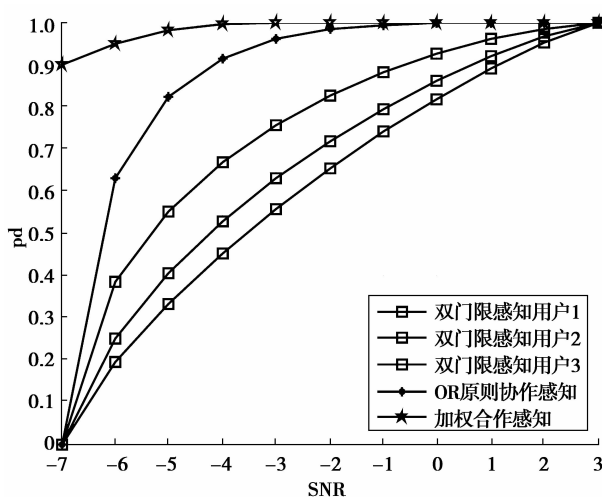


图3 加权协同检测和传统的协同感知对比

选择用于协同检测的认知用户数为 3 个, 单个用户均采用双门限能量检测算法, 而且单个认知用户 2 个门限的差 $\lambda_{i1} - \lambda_{i2}$ ($i = 1, 2, 3$) 均不相同。用

式(11)计算检测概率。在仿真过程中, 比较分析了 3 个节点单独进行判决、基于“或”准则的协同感知以及提出的基于信任度权重的协同感知的检测性能, 仿真结果如图 3 所示。由图可以看出, 采用基于信任度权重的协同感知的检测性能获得了很大提高, 比采用“或”准则的等权重协同感知算法的检测性能也有较大改善。改进算法在信噪比低于 -6 dB 时, 仍能获得可靠的检测效果。

5 结论

由于能量检测法在实际应用中易受环境噪声波动的影响, 为了提高单个节点的感知性能, 以双门限能量检测算法为基础, 分析了单节点双门限设置与节点感知性能之间的关系, 以双门限相对距离作为信任度权重进行协同感知。仿真结果表明, 改进的基于相对距离的加权协同感知算法较传统的能量检测算法和等权重协同检测算法, 检测性能得到了较大提高, 与“或”准则协作检测方法相比, 改进算法在信噪比低于 -6 dB 时, 仍能获得可靠的检测效果。在下一步研究中, 将结合无线衰落信道环境并考虑更复杂的分布情况进行改进, 以提高频谱感知的快捷性和可靠性。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [2] QUAN Z, CUI S G, 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.
- [3] SHENT B, HUANG L Y, ZHAO C S, et al. Energy detection based spectrum sensing for cognitive radios in noise of uncertain power [C] // Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies, Oct. 21-23, 2008, Vientiane, Laos; IEEE, 2008; 628-633.
- [4] 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.
FENG WEN-JIANG, GUO YU, HU ZHI-YUAN. Spectrum sensing technologies in cognitive radio[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(11):46-49.
- [5] SUTTON P D, NOLAN K E, DOYLE L E.

- Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 13-24.
- [6] 林生森, 吴启晖, 基于循环相关滤波联合循环谱的频谱感知技术[J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 9(4): 307-311. .
LIN SHENG-SEN, WU QI-HUI. Spectrum sensing method based on cyclic correlation filter and spectral correlation[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2008, 9(4): 307-311.
- [7] YE Z, MEMIK G, GROSSPIETSCH J. Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//*Proceedings of the IEEE international Conference on Wireless Communications and Networking*, March31-April3, 2008. Las Vegas, USA:IEEE, 2008;711-716.
- [8] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. *Proceedings of IEEE*, 1967, 55(4):523-531.
- [9] SRIVASTAVA S K, BANERJEE A. 'N-ratio' logic based cooperative spectrum sensing using double threshold energy detection[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, June 22-24, 2009. Hannover, Germany: IEEE, 2009: 1-6.
- [10] HONG L, MA J F, XU F M, et al. Optimization of collaborative spectrum sensing for cognitive radio[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, April 6-8, 2008. Sanya, China: IEEE, 2008;1730-1733.
- [11] JIANG W, MA H Z. Cooperative spectrum sensing for cognitive radio in rayleigh channels[C] // *Proceedings of the 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE)*, Dec. 26-28, 2009. Nanjing, China: IEEE, 2009: 2595-2598.
- [12] ZHANG L, XIA S Q. A new cooperative spectrum sensing algorithm for cognitive radio networks [C] // *Proceedings of the International Conference on Computing, Communication, Control, and Management*, Aug. 8-9, 2009, Sanya. China: IEEE, 2009, 1:107-110.
- [13] ZHENG Y, XIE X Z, YANG L L. Cooperative spectrum sensing based on SNR comparison in fusion center for cognitive radio [C] // *Proceedings of the International Conference on Advanced Computer Control*, Jan. 22-24, 2009. Singapore: IEEE, 2009: 212-216.
- [14] LI L, CAI Y, ZHU H B. A new cooperative spectrum sensing algorithm in cognitive networks [C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Sept. 24-26, 2009. Beijing, China: IEEE, 2009: 1-4.
- [15] ZHU J, XU Z G, WANG F R, et al. Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. Singapore: IEEE, 2008:1-5.
- [16] SUN C H, ZHANG W, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking*, March11-15, 2007. Hong Kong, China: IEEE, 2007: 1-5.

(编辑 侯 湘)