



230 MHz 电力专属频段频谱认知技术研究

李建岐¹, 黄毕尧¹, 杨婷婷², 吴玉成²

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 为实现 230 MHz 频段电力无线通信频谱的快速可靠认知, 提出一种协作式步进频域能量检测算法。该算法在频域进行 2 次步进能量检测, 第一次步进能量检测以较大的步进值对全频段进行快速检测, 检测中被占用的频带将以较小的步进值进行第二次步进能量检测。同时, 监测频段、步进值等关键参数可根据实际需求灵活配置, 最终得到 230 MHz 频段的频点使用情况。仿真结果表明, 与传统频域能量检测算法相比, 该算法在低信噪比条件下可获得较高的检测概率, 且适用于 230 MHz 电力专属频段的频谱实时监测。

关键词: 无线通信; 认知无线电; 230 MHz 频段; 频谱认知; 能量检测; 低信噪比; 检测概率

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 李建岐, 黄毕尧, 杨婷婷, 等. 230 MHz 电力专属频段频谱认知技术研究[J]. 计算机工程, 2020, 46(7): 173-178.

英文引用格式: LI Jianqi, HUANG Biyao, YANG Tingting, et al. Research on spectrum sensing technology of 230 MHz power-specific frequency band[J]. Computer Engineering, 2020, 46(7): 173-178.

Research on Spectrum Sensing Technology of 230 MHz Power-Specific Frequency Band

LI Jianqi¹, HUANG Biyao¹, YANG Tingting², WU Yucheng²

(1. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] In order to realize the fast and reliable recognition of wireless power communication frequency spectrum in the 230 MHz frequency band, this paper proposes a Cooperative Stepper Frequency Domain Energy Detection (CSFDED) algorithm. The algorithm performs 2 times of step energy detection in the frequency domain. The first time of step energy detection will quickly detect the entire frequency band with a larger step value, and the frequency band occupied in the detection will be subjected to the second time of step energy detection with a smaller step value. At the same time, key parameters such as monitoring frequency band and stepping value can be flexibly configured according to actual needs, and finally the usage of frequency points of the 230 MHz frequency band are obtained. The simulation results show that, compared with the traditional frequency domain energy detection algorithm, the proposed algorithm can obtain a higher detection probability under low Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions, and is suitable for real-time spectrum monitoring in the 230 MHz power-specific frequency band.

[Key words] wireless communication; cognitive radio; 230 MHz frequency band; spectrum sensing; energy detection; low Signal-to-Noise Ratio (SNR); detection probability

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055687

0 概述

随着科学技术的发展和大量新兴技术的应用,

社会生活对电力愈发依赖, 同时对供电可靠性、稳定性的要求也越来越高^[1]。接入的设备类型和数量与日俱增使得电网形态日益复杂, 电网安全运行的压

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“低功耗广域工业物联网通信技术在配电网状态监测应用研究”(5455HT180027)。

作者简介: 李建岐(1969—), 男, 教授级高级工程师, 主研方向为电力通信、智能电网; 黄毕尧, 高级工程师、博士; 杨婷婷, 硕士研究生; 吴玉成, 教授、博士、博士生导师。

收稿日期: 2019-08-07

修回日期: 2019-09-27

E-mail: lijianqi@geiri.sgcc.com.cn

力也随之增大。电力市场开放、输配电价格降低、电量增长减速等因素使得电网业务面临着日趋激烈的市场竞争,使得企业发展模式急需转型。社会经济形态的转型迫使电网关注供需双方打造多边市场,对传统电力行业提出了新的挑战^[2]。

2020 年,国家电网公司提出建设具有中国特色全球领先能源互联网企业战略,大力推进能源革命与数字革命融合发展,应用先进能源技术、通信技术、信息技术、控制技术,构建清洁低碳、安全可靠、泛在互联、高效互动、智能开放的智慧能源系统。智能电网和电力物联网是能源互联网在电力系统中的具体实现形式,对于推动电网与互联网深度融合具有重要的意义,前者支撑电力能源流的安全稳定传输,后者实现电力信息流的传递和归集处理。电力物联网通过状态全面感知、信息高效处理、便捷灵活应用为电网安全经济运行提供强有力的支撑。

电网中的物联网技术虽有巨大的发展潜力,但也面临着很多发展难题^[3],而无线通信技术无需电网架构的支撑,抗毁性强且具备高带宽、长距离传输等优点,在电网中发挥着重要的作用^[4-5]。数据传输需求与频谱资源紧张的矛盾日益凸显,使得电力信息的及时、可靠接入与传递,以及各系统间的实时可靠通信成为制约电网稳定、高效运行的瓶颈之一。为提高频谱资源利用率、保证稳定可靠的无线通信,认知无线电技术被广泛应用于电力物联网建设^[6-8]。频谱感知技术作为认知无线电技术的核心,一直备受世界各机构、以及广大学者的关注。频谱感知技术中,能量检测技术凭借其无需任何先验信息、实现简单、系统开销小等优点,被广泛应用于不同的频谱感知场景中。文献[9]提出一种结合能量感知和循环平稳特征感知 2 种检测算法的两级双门限本地频谱感知算法,根据噪声不确定度的大小自动调整循环平稳特征感知的比例。循环平稳特征检测在对抗噪声不确定度带来不利影响的同时,也会增加系统开销和感知延时。文献[10]提出一种基于最大似然比准则的能量检测算法,实现复杂度较低,但却难以适应不同带宽、不同场景下的频谱感知需求。文献[11]在兼顾频谱分辨率和检测速度的基础上,提出一种可变步进值的 2 阶段步进频域能量检测方法,但在低信噪比下其检测性能并不理想。

基于上述考虑,结合电力无线通信频谱认知的高可靠、低延时需求,本文提出一种适用于 230 MHz 频段的协作式步进频域能量检测 (Cooperative Stepped Frequency Domain Energy Detection, CSFDED) 算法,实现对 223 MHz ~ 235 MHz 频段频谱使用情况的实时监测。与传统协作能量检测算法不同^[12],该算法在频域进行 2 次步进能量检测时,在不显著增加复杂度的情况下,可在保证检测精度和检测速度的同时实现对宽带频谱的快速检测。

1 电力频谱政策及其对频谱认知的影响

为满足电力等行业以及能源互联网的频率需求,提高频率使用效率和效益,2018 年,中国工业和信息化部下发的《关于调整 223 MHz ~ 235 MHz 频段无线数据传输系统频率使用规划的通知》明确指出 223 MHz ~ 226 MHz 和 229 MHz ~ 233 MHz 频段(除专用频率外)主要用于电力等行业宽带无线应用,鼓励相关行业部门和单位采用共网模式使用该频段。此外,该通知还详细规定了宽带无线通信发射设备的相关技术指标,例如:双工方式为 TDD,单个信道基本带宽为 25 kHz,支持工作频段内任意离散信道聚合使用,这意味着电力专网中基带、终端的系统带宽均为 $25 \text{ kHz} \times N (N=1, 2, \dots, 280)$ 。

在新的频谱政策下,230 MHz 频段为多行业、多系统共享使用的频段,且宽窄系统共存。同时,由于工业物联网技术的广泛应用,在 230 MHz 频段可能存在 12.5 kHz、6.75 kHz 以及物联网应用的 100 Hz 等多种带宽形式,要求不仅能够快速检测出 230 MHz 频带内的频谱分布情况,还需要快速获得对细分信道的频率使用情况,为后续信号识别、频谱管理提供决策依据^[14]。

2 单节点频域能量检测模型

基于频域能量检测的频谱认知技术是在一定时间、特定频段内利用周期图方法直接计算信号的功率谱,并将其与预设门限值进行比较,判断该频段是否被占用^[14],其流程如图 1 所示。

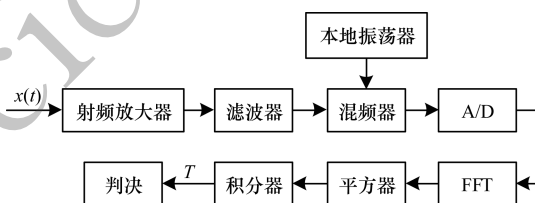


图 1 频域能量检测流程

Fig. 1 The flow of frequency domain energy detection

假设 $x(t)$ 是监测节点接收到的信号, $s(t)$ 是占用该频谱的设备发出的信号, $n(t)$ 是对应通道的加性高斯白噪声,且 $n(t)$ 和 $s(t)$ 之间相互独立,则特定频段的频谱认知问题可建模为^[15]:

$$H_0: x(t) = n(t)$$

$$H_1: x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, H_0 表示频谱未被占用,即频谱空闲的情况, H_1 表示频谱被占用,频谱认知判决规则为^[16]:

$$H_0: T < \lambda$$

$$H_1: T \geq \lambda \quad (2)$$

其中, T 为一段时间内特定频段的检测统计量, λ 是预设的判决门限。在高斯白噪声环境下对特定频段进行频谱监测,由文献[17]可知,当采样点数 N 足够大时,根据中心极限定理可得检测统计量 T

满足:

$$H_0: T \sim N(\sigma_n^2, \frac{2}{N}\sigma_n^4) \quad (3)$$

$$H_1: T \sim N(\sigma_s^2 + \sigma_n^2 + u^2, \sigma_1^2)$$

其中, $\sigma_1^2 = 2/N(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)(2u^2 + \sigma_s^2 + \sigma_n^2)$, σ_n^2 为高斯白噪声的方差, u 和 σ_s^2 分别为电力系统内有用信号的均值和方差。频谱认知算法的性能通常用检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 衡量, P_d 表示频谱被占用时的准确判决概率, 而 P_f 表示频谱空闲但被错误判决为频谱被占用的概率^[18]。单节点频域能量检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为:

$$P_d = \text{Prob}\{T > \lambda \mid H_1\} = Q\left(\frac{\lambda - (\sigma_s^2 + \sigma_n^2 + u^2)}{\sigma_1}\right) \quad (4)$$

$$P_f = \text{Prob}\{T > \lambda \mid H_0\} = Q\left(\frac{\lambda - \sigma_n^2}{\sqrt{2/N}\sigma_n}\right) \quad (5)$$

其中, $Q(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 为标准正态分布的右尾函数。

3 协作式步进频域能量检测算法

为实现电力通信网络中 230 MHz 频段的频谱认知, 考虑到需实时监测的频段带宽较宽 (12 MHz)、硬件设备处理能力有限, 同时认知结果应结合最新频谱政策, 给出带宽为 25 kHz 的频点使用状况, 本文提出一种 CSFDED 算法。感知频段较宽, 在工程上一次性完成全频段的频谱检测实现难度较大, 为此采取多次步进频域能量检测, 并综合检测结果实现大范围的宽带频谱认知。

3.1 门限选取

实际应用中, 过高的虚警概率 P_f 将导致空闲频谱搜寻失败、频谱效率降低, 而检测概率过低将误导用户接入被占用的频谱, 引发通信冲突、扰乱该通道上的正常通信^[19]。在保证虚警概率 P_f 足够小的前提下, 改进频谱认知算法尽可能提高检测概率, 保证实时、准确检测出空闲频谱是电力网络中频谱认知的关键。CSFDED 算法采用固定单个监测节点虚警概率的方式, 即保证空闲频段检测失败的概率维持一个足够低的水平, 各个监测节点根据信道环境自适应调整各自的判决门限值, 避免人为设定判决门限值对算法稳定性造成的影响。同时, 各个节点独立设置门限值, 可在一定程度上减小噪声不确定度带来的影响。由式 (5) 可得门限值的计算方法表示如下:

$$\lambda_i = \left(\frac{2}{N}Q^{-1}(P_f) + 1\right)\sigma_{n,i}^2 \quad (6)$$

其中, $\sigma_{n,i}^2$ 是第 i 个监测节点长时间观测得到的背景噪声方差。则由式 (4)、式 (6) 可得各个监测节点的检测概率为:

$$P_{d,i} = Q\left(\frac{2/NQ^{-1}(P_f)\sigma_{n,i}^2 - (\sigma_{s,i}^2 + u_i^2)}{\sqrt{A_i}}\right) \quad (7)$$

其中, $A_i = 2/N(\sigma_{s,i}^2 + \sigma_{n,i}^2)(2u^2 + \sigma_{s,i}^2 + \sigma_{n,i}^2)$ 。 $\sigma_{s,i}^2$ 和 u_i 分别为第 i 个监测节点接收到的其他设备发出信号的方差和均值。

3.2 协作策略

在实际环境中, 单节点检测容易受到衰落、多径、强背景噪声等因素的影响, 会导致检测性能急剧恶化, 协作频谱认知可通过多个节点协同检测, 融合判决对抗多径效应、阴影效应、隐藏终端等问题^[15]。

协作检测中融合判决准则分为硬融合判决和软融合判决, 常用的硬融合判决准则有“或”准则、“与”准则和“K 秩”准则^[20]。实际上, “或”准则是 $K=1$ 的“K 秩”准则, “与”准则是 $K=L$ 的“K 秩”准则。考虑电网频谱认知中监测节点应满足广地域覆盖、低功耗工作、传输时延尽可能小等需求, 本文算法采用硬融合判决中的“K 秩”准则, 即在参与协作的监测节点中若有 K 个或大于 K 个监测节点则判决频谱被占用, 汇聚节点才能判决频谱处于非空闲状态, 其中 K 值可根据实际应用场景进行调整。硬融合判决虽然在检测性能上稍逊于软融合判决准则, 但在信息融合时各个监测节点只需发送 0 或 1 (0 表示频谱空闲、1 表示频谱被占用) 到汇聚节点, 在一定程度上减小了数据传输开销和传输时延。假设参与协作的监测节点数为 L , 以 T_i 表示第 i 个监测节点的检测统计量, R_i 表示各个监测节点发送到汇聚节点的频谱认知数据, 则有:

$$R_i = \begin{cases} 0, & T_i < \lambda \\ 1, & T_i \geq \lambda \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, \dots, L$ 。汇聚节点融合各个监测节点的频谱感知结果, 判决准则如下:

$$D = \begin{cases} H_0, & \sum_{i=1}^L R_i < K \\ H_1, & \sum_{i=1}^L R_i \geq K \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, K 值是判决准则的关键参数, 根据实际应用场景及具体技术指标, 可自由选取合适的 K 值以最大化检测概率。

3.3 算法实现流程

在步进检测中, 检测频带带宽分辨率和检测时长受步进值影响时, 步进值越小, 则检测频带带宽分辨率越高、检测耗时越长。较大的步进值可以减少检测复杂度, 减小检测时长, 但会导致检测分辨率降低。为满足各项检测需求, 兼顾 230 MHz 频段频谱认知的检测耗时与检测分辨率, 本文算法第一次检测采用较大的步进值完成全认知频段的快速粗检测, 第二次检测采用较小的步进值完成频段内可用频点的细搜索。CSFDED 算法的流程如图 2 所示。首先, 根据实际应用需求设置 2 次检测的步进值, 在

230 MHz 频段认知中感知频段为 223 MHz ~ 235 MHz, 较大的步进值和较小的步进值可分别设为 2 MHz 和 25 kHz。基本参数设置完毕后, 参与协作的检测节点独立完成频域能量检测, 汇聚节点融合判决。为减少检测时长, 仅对第一次频谱认知中判决为频带占用的频段进行 2 次检测, 以较小的步进值再进行多次单步检测, 直至以 25 kHz 为单位精确检测出整个 230 MHz 频段内被占用的所有频点。本文算法可设定任意的步进值以适应不同的检测环境需求, 可满足窄带、超窄带通信场景下的频谱检测需求, 实现任意带宽的频谱状态感知。

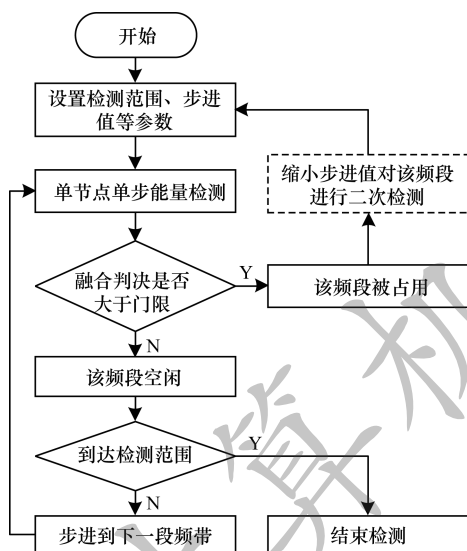


图 2 本文算法的流程

Fig. 2 The flow of the proposed algorithm

4 仿真分析

为验证本文算法的有效性, 利用 MATLAB 对 230 MHz 频段的频谱认知进行仿真实验, 仿真实验参数设置如下: 参与协作的监测节点数 $L=4$, 虚警概率设为 0.1, 采样点数为 2 000, 仿真次数为 3 000 次。

利用多音正弦信号和窄带信号的混合信号模拟 230 MHz 频段内各类通信设备发出的有用信号, 当不存在噪声时, 230 MHz 频段频谱使用情况如图 3 所示。

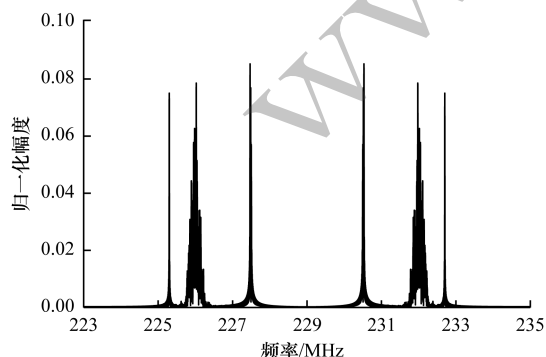


图 3 230 MHz 频段频谱使用情况

Fig. 3 Spectrum usage in the 230 MHz band

信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 -5 dB 时, 230 MHz 频段频谱占用情况如图 4 所示。第一次检测时以步进值为 2 MHz 依次对 223 MHz ~ 225 MHz、225 MHz ~ 227 MHz、227 MHz ~ 229 MHz、229 MHz ~ 231 MHz、231 MHz ~ 233 MHz 和 233 MHz ~ 235 MHz 频段进行频谱检测, 检测出被占用的频段为 225 MHz ~ 227 MHz、227 MHz ~ 229 MHz、229 MHz ~ 231 MHz、231 MHz ~ 233 MHz。

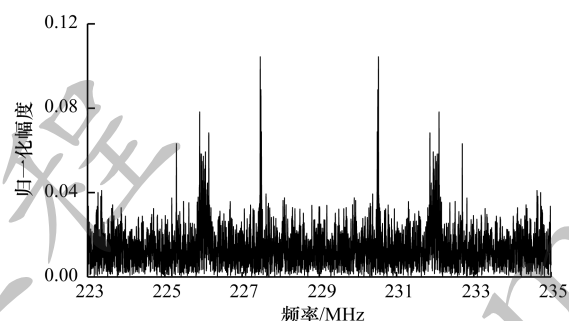


图 4 230 MHz 频段频谱使用情况 (SNR 为 -5 dB)

Fig. 4 Spectrum usage in the 230 MHz band (SNR is -5 dB)

第二次检测时以 25 kHz 为步进值对第一次检测出的占用频段进行二次检测, 筛选出带宽为 25 kHz 的可用频点。图 5 是采用本文算法对 230 MHz 频段进行频谱认知得到的频谱使用情况, 其中, 0 表示频谱空闲, 1 表示频谱被占用, 即黑色区域表示监测频段范围被占用的频段。从图 5 中可以看出, 本文算法可以正确检测出被占用的频点 (带宽为 25 kHz), 为电力行业新型宽带技术提供可用频点信息。同时, 可灵活设置检测频带范围、更改步进值以满足不同的应用需求。

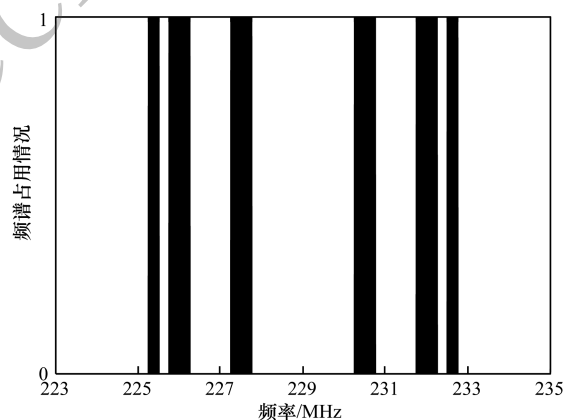


图 5 230 MHz 频段频谱认知结果 (SNR 为 -5 dB)

Fig. 5 230 MHz band spectrum recognition results (SNR is -5 dB)

图 6 是不考虑噪声不确定度时 (假设噪声方差在一段时间、一定范围内是固定不变的), 在不同 K 值下本文算法的检测概率随 SNR 变化的关系曲线图。由图 6 可知, 本文算法在不同 K 值下的检测性

能存在差异,在当前的仿真条件下,选取 $K=1$ 作为融合判决的关键参数可获得最佳性能。当 SNR 低于 -17 dB 时,本文算法在所有 K 值下的检测概率都趋近于 0,此时限制检测性能提升的关键参数是采样点数和虚警概率。

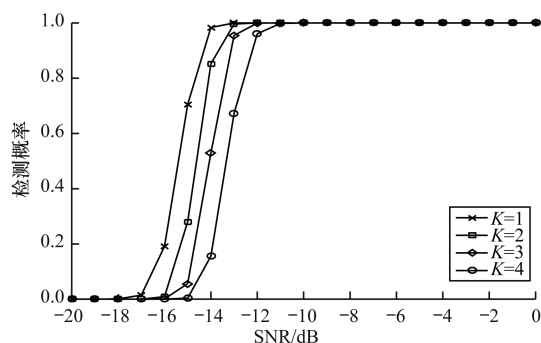


图6 不同 K 值下检测概率与 SNR 的关系曲线

Fig.6 Curves of the relationship between detection probability and SNR under different K values

图7给出了 $K=1$ 时的传统频域能量检测(简称 ED)算法与本文算法的检测性能对比。由图7可知,本文算法在不显著增加算法复杂度的前提下具有更高的检测准确度。

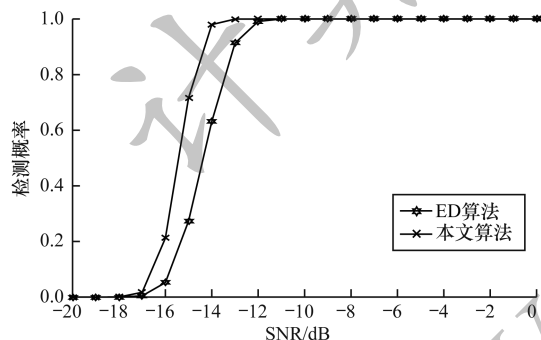


图7 传统频域能量检测算法与本文算法的检测概率比较

Fig.7 Comparison of detection probability between traditional frequency domain energy detection algorithm and the proposed algorithm

当 $K=1$ 时,不同采样点数下本文算法的检测概率随 SNR 变化的关系曲线如图8所示。从图8可以看出,在其他检测参数相同时,增加采样点数即增加观测信号的长度,可改善低 SNR 下算法的检测性能。同时,随着样本数的增加,检测概率增大的速度也逐渐缓慢,且采样点数 $N=8\,000$ 和 $N=10\,000$ 时的检测性能差异较小。过大的样本点数会增加处理延时和硬件实现难度,影响算法检测速度。因此,样本点数并非越多越好,设置采样点数应兼顾检测速度、硬件实现难度和检测精度,可在高 SNR 条件下

设置较小的 N 值来提高检测速度,在低 SNR 条件下选取较大的 N 值来提高检测概率。

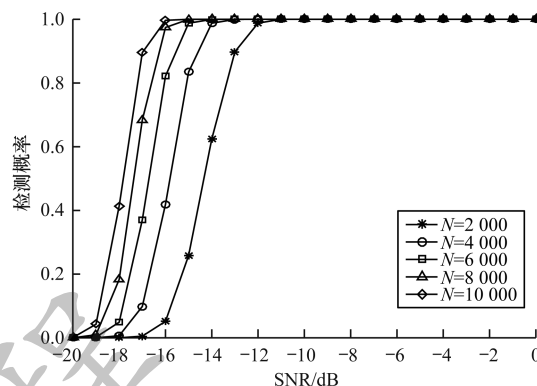


图8 不同采样点数下检测概率与 SNR 的关系曲线

Fig.8 Curves of the relationship between detection probability and SNR at different sampling points

5 结束语

为推动泛在电力物联网的建设和发展,缓解电力无线网络中与日俱增的宽带通信业务需求与有限的 230 MHz 频谱资源之间的矛盾,本文提出一种 CSFDED 算法。该算法无需任何先验信息,且计算量小、易于实现,同时可自行设置监测频段、步进值等关键参数以适应于不同场景的应用需求。仿真结果表明,本文算法可实现任意带宽频点的使用状况检测,而融合准则 K 值以及采样点数 N 的选取会带来性能差异,在实际应用时应按实际情况选取合适的参数值以实现最大化检测性能,同时,该算法还可用于其他频段的频谱认知,也可应用于宽带信号干扰检测中,具有实用意义。下一步考虑将本文算法应用到宽带信号干扰检测中,同时进一步研究相应的干扰信号识别算法,为宽带信号的干扰检测问题提供一种新的途径与方法。

参考文献

- [1] TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589. (in Chinese)
田世明,王蓓蓓,张晶.智能电网条件下的需求响应关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(22): 3576-3589.
- [2] CAO Jinping, LIU Jianming. A two-stage double-threshold local spectrum sensing algorithm research for the power private communication network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2471-2479.
- [3] ZHAO Lin. Application of spectrum sensing technology in wireless communication of smart grid [C]// Proceedings of International Conference on Robots and Intelligent System. Washington D. C., USA: IEEE

- Press, 2018:182-185.
- [4] LI Jianqi, LU Yang, GAO Hongjian. On (power-) line defined power line communication solution based on channel sensing [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20):5235-5243. (in Chinese)
李建岐, 陆阳, 高鸿坚. 基于信道认知在线可定义的电力线载波通信方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20):5235-5243.
- [5] SUN Ying, ZHONG Yuqing, WANG Min, et al. Application of spectrum sensing technology in 230MHz frequency band [J]. Electrical Applications, 2015, 34(S1):690-693. (in Chinese)
孙颖, 衷宇清, 王敏, 等. 频谱感知技术在 230MHz 频段的应用[J]. 电气应用, 2015, 34(S1):690-693.
- [6] XUE Wei, JIN Zhiming. On clustering optimisation of cooperative spectrum sensing in cognitive radio [J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(4):227-230. (in Chinese)
薛伟, 金智明. 认知无线电中合作频谱感知的分簇优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4):227-230.
- [7] HU Xiaoning, WU Guofeng, HU Hanying. Optimization for cooperative spectrum sensing mechanism in cognitive radio system [J]. Computer Engineering, 2011, 37(18):68-70. (in Chinese)
胡晓宁, 仵国锋, 胡捍英. 认知无线电系统协作频谱感知机制优化[J]. 计算机工程, 2011, 37(18):68-70.
- [8] DENG Ruilong, CHEN Jiming, CAO Xianghui, et al. Sensing-performance tradeoff in cognitive radio enabled smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1):302-310.
- [9] CAO Jinping, LIU Jianming. A two-stage double-threshold local spectrum sensing algorithm research for the power private communication network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10):2471-2479. (in Chinese)
曹津平, 刘建明. 一种应用于电力无线专网的两级双门限本地频谱感知技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10):2471-2479.
- [10] CHIN W L, LI J M, CHEN H H. Low-complexity energy detection for spectrum sensing with random arrivals of primary users [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2):947-952.
- [11] DONG Shuya, WU Xiaoqin, BAI Yong. Wideband spectrum sensing method based on step by step frequency domain energy detection [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2016, 34(3):215-220. (in Chinese)
董淑雅, 伍小芹, 白勇. 基于步进频域能量检测的宽带频谱感知方法研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, 34(3):215-220.
- [12] LIU Shiqi, CHEN Chongqian, LI Haihong, et al. Double thresholds energy detection based cooperative spectrum sensing for cognitive radios [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(3):420-424. (in Chinese)
刘仕奇, 陈崇谦, 李海宏, 等. 基于双门限能量检测的认知无线电协作频谱感知[J]. 电波科学学报, 2013, 28(3):420-424.
- [13] ZHOU Hao, GAO Yuan, ZHU Changping. Alternative cooperative spectrum sensing based on double threshold energy detection [J]. Computer Simulation, 2014, 31(1):199-203. (in Chinese)
周浩, 高远, 朱昌平. 基于双门限能量检测的选择式协作频谱感知[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1):199-203.
- [14] LIU Yixian, JI Fei, YU Hua. Performance of energy detection based on estimated noise power in cognitive radio networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6):1487-1491. (in Chinese)
刘义贤, 季飞, 余华. 认知无线网络中基于噪声功率估计的能量检测性能[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6):1487-1491.
- [15] GUO Jiabei, ZHANG Jianwu. Dynamic threshold cooperative sensing method based on SNR [J]. Computer Engineering, 2012, 38(3):91-92, 96. (in Chinese)
郭加贝, 章坚武. 一种基于信噪比的动态门限协作感知方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3):91-92, 96.
- [16] HUANG He, YUAN Chaowei. A sequential cooperative spectrum sensing algorithm based on dynamic adaptive double-threshold energy detection [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(5):1037-1043. (in Chinese)
黄河, 袁超伟. 基于动态自适应双门限能量检测的序贯协作频谱感知算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5):1037-1043.
- [17] CHU Guangqian, NIU Kai, WU Weiling, et al. Two step cooperative spectrum sensing scheme over fading channels for cognitive radio [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(6):92-97. (in Chinese)
初广前, 牛凯, 吴伟陵, 等. 认知无线电衰落信道的两步协作频谱感知方案[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(6):92-97.
- [18] MIAO Bingmei, WANG Yafang, LI Yan, et al. Twice-cooperative spectrum sensing based on energy detection [J]. Communications Technology, 2017, 50(8):1708-1713. (in Chinese)
苗兵梅, 王亚芳, 李岩, 等. 基于能量检测的 2 次协作频谱感知[J]. 通信技术, 2017, 50(8):1708-1713.
- [19] ZENG Li. Cognitive radio key spectrum sensing technology and application analysis [J]. Communication & Information Technology, 2017(1):59-62. (in Chinese)
曾莉. 认知无线电关键频谱感知技术及应用分析[J]. 通信与信息技术, 2017(1):59-62.
- [20] ZHANG Haibo, ZHANG Jin, LI Fangwei. User selected collaborative spectrum sensing based on energy detection [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(3):658-664. (in Chinese)
张海波, 张劲, 李方伟. 基于能量检测的用户选择协作频谱感知[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3):658-664.

编辑 刘继娟