



一种应用于电力无线专网的基于信任度的协作频谱感知算法

曹津平¹, 李 伟², 张翼英¹

(1. 国家电网公司信息通信分公司 北京 100761; 2. 华北电网有限公司 北京 100053)

摘 要: 新型电力无线宽带系统是为满足智能配用电系统的通信需求, 在电力专用 230 MHz 频谱资源上研究开发的电力无线专网, 该系统在应用过程中可能会存在与 230 数传电台共用同一段频谱的情况。为保证两个系统同时稳定、高效地运行, 提出一种基于信任度的协作频谱感知算法。根据用户行为特点将感知用户分为受信感知用户、失效用用户和干扰用户, 并对非受信用户给出相应的判定方法; 分析受信用户本地检测结果与参与协作的感知用户及其通信信道信噪比之间的关系, 进而定义出各感知用户可信度的权重, 并在此基础上提出一种基于信任度的协作频谱感知算法。仿真结果表明, 相比传统的硬判决协作频谱检测方法, 基于感知用户信任度的协作感知算法能获得更高的检测性能。

关键词: 认知无线电; 电力无线通信; 频谱感知; 信任度

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015082

Trust-Based Cooperative Spectrum Sensing Algorithm in Power Dedicated Network

Cao Jinping¹, Li Wei², Zhang Yiyi¹

(1. State Grid Information & Telecommunication Branch, Beijing 100761, China;

2. North China Grid Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: To fulfill the communication needs of smart distribution and utilization system, a novel power dedicated network has been developed. The system faces a problem that it may operate coexisted with a 230 data transceiver system. In order to keep the two systems operating stably and efficiently at the same time, a trust-based cooperative spectrum sensing algorithm was presented. According to the characteristics of user behavior, cognitive radio users were classified into fiduciary users, lapsed users and malicious users. By analyzing the relationship among detection result, credibility of cognitive radio users and communication channel signal-to-noise ratio, the credibility weight of cognitive radio users was given, and a trust-based cooperative spectrum sensing algorithm was proposed. The simulation results show that the algorithm improves detection performance effectively.

Key words: cognitive radio, electric power wireless communication, spectrum sensing, trust

收稿日期: 2014-09-25; 修回日期: 2015-03-10

论文引用格式: 曹津平, 李伟, 张翼英. 一种应用于电力无线专网的基于信任度的协作频谱感知算法. 电信科学, 2015082

Cao J P, Li W, Zhang Y Y. Trust-Based Cooperative Spectrum Sensing Algorithm in Power Dedicated Network. Telecommunications Science, 2015082



1 引言

无线通信是一种在配用电系统使用非常普遍的通信方式。目前国内电力无线通信使用较多的通信方式有 GPRS、CDMA 和 230 数传电台等。GPRS 和 CDMA 都属于公网无线技术,虽然不需要专门为电力业务敷设网络,但其网络的安全性、可靠性不如专网,并且需要向电信运营商缴纳高昂的租用费用;230 数传电台是在电力专用 230 MHz 频谱上采用数传电台技术开发的电力无线专网,由于数传电台技术比较落后,采用的是点对点查询方式,传输速率和频率效率都很低,不能满足配用电系统智能化的需求。

为了满足智能配用电系统的发展建设需要,国家电网公司在电力专用频谱上研究开发了一种新型电力无线宽带系统(以下简称 LTE230 系统),该系统采用 OFDM、载波聚合、干扰抑制等关键技术,实现对电力业务的定制开发。经过现场测试,与 GPRS 和数传电台相比,该系统具有频谱效率高、数据吞吐量、支持多媒体业务能力和系统稳定性好等综合优势。

目前国内很多地区还在使用 230 数传电台,因此在推广应用 LTE230 系统时可能会出现两个系统同时存在的情况。数传电台采用查询方式工作,当两个系统同时存在时,如果 LTE230 系统不进行避让,很可能对 230 数传电台造成较大的干扰,导致 230 数传电台反复重传,增加了系统间互相干扰的时间,影响系统的正常运行。

如何保证两个系统在同一频谱资源上稳定运行,是提升电力无线专网效率需要解决的实际问题。针对这种情况,本文提出在 LTE230 系统上采用频谱感知技术,捕捉频谱范围内的 230 数传电台信号,当发现两者同时使用同一个频点时及时进行避让,以保障系统的稳定运行,提高系统的频谱利用效率。

为保证系统的正常稳定运行,本文将 230 数传电台设为授权用户, LTE230 系统设为感知用户。参考文献[1~5]提出了一种基于信任度的加权协作频谱检测算法,通过分析本地检测性能与感知用户和信噪比之间的关系,进而给出各感知用户可信度的权重,并将信任度权重代入进行数据融合和判决。仿真结果表明,相较传统的硬判决协作频谱检测方法,本文提出的算法获得的检测结果更有效。

2 电力无线专网的二元假设模型

频谱感知即频谱检测技术,包括“频谱空穴”的搜寻和判

定以及频谱状态的实时监测,可避免授权用户受到有害干扰,是认知无线网络提高频谱资源利用率的重要前提^[6]。

由于是否存在可用频谱主要取决于频谱上授权用户的占用情况,因此频谱感知模型通常用描述授权用户信号的二元假设模型来表示。

设 $x_i(t)$ 为第 i 个感知用户接收到的信号, $s_i(t)$ 为其接收到的 230 数传电台的发射信号, $n_i(t)$ 为对应通道的加性高斯白噪声,则电力无线专网的频谱感知模型可表示为:

$$x_i(t) = \begin{cases} n_i(t), & H_0 \\ s_i(t) + n_i(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_0 表示 230 数传电台信号不存在, H_1 表示 230 数传电台信号存在。

该二元假设模型存在两类检测错误概率:虚警概率 P_f 和漏检概率 P_d 。虚警概率是授权用户实际上没有出现,但被错误判断为存在授权用户的概率;检测概率为实际存在授权用户,并正确地判断出存在授权用户的概率,即:

$$\begin{cases} P_f = P(x > \lambda | H_0) \\ P_d = P(x > \lambda | H_1) \end{cases} \quad (2)$$

实际应用中,通常用 P_f 和 P_d 衡量频谱感知的性能, P_f 过高会损失一些原本可用的频谱机会,导致频谱利用率下降; P_d 过低会增加影响授权用户正常运行的干扰。

依据奈曼—皮尔逊准则,要提高认知无线网络中的频谱感知性能,在 P_f 一定的条件下,应尽量提高 P_d 。在进行频谱检测性能分析时,通常用接收机操作特性曲线(receiver operation characteristic, ROC) 来描述虚警概率与检测概率之间的相互关系^[7]。

3 协作频谱感知算法

由于各感知用户分布在不同位置,信息之间存在冗余和矛盾。在实际应用中,仅凭借单用户本地检测很难达到要求的性能指标。协作检测通过信息融合协调使用多个感知用户的检测信息,加以互补,降低其不确定性,从而获得对授权用户状态的一致性描述,从而明显提升系统性能。

在协作频谱感知中,感知用户将本地检测结果依据控制信道带宽的要求上报给融合决策中心(fusion center, FC)或相邻用户,比较常见的融合方式有“与”准则、“或”准则和“K”秩法。

“与”准则可描述为:对每个感知用户检测到的结果进行“与”逻辑合并。从物理层次上表现为所有参与检测的节点都做出授权信号存在的判断时才判定信号存在,否则判

定不存在^[7]。其检测概率 Q_d 、虚警概率 Q_f 分别为:

$$Q_d = \prod_{i=1}^N P_{d,i}$$

$$Q_f = \prod_{i=1}^N P_{f,i} \quad (3)$$

“或”准则可描述为:对每个感知用户检测得到的结果进行“或”逻辑合并。从物理层次上表现为只要有一个认知用户做出授权用户存在的判断,就判定授权用户存在^[7]。检测概率 Q_d 、虚警概率 Q_f 分别为:

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{d,i})$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i}) \quad (4)$$

“K”秩法可描述为:假设感知用户数为 N , 当有 K 个以上的感知用户判断授权用户信号存在时,则判定授权用户存在,否则认为授权用户不存在。

“K”秩法的假设检验模型为:

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

其中, D_i 为第 i 个节点的判决结果。

假设有 N 个节点, 第 i 个节点的检测概率与虚警概率分别为 $P_{d,i}$ 、 $P_{f,i}$, 则可得到采用“K”秩法后系统的检测概率 Q_d 、虚警概率 Q_f 分别为:

$$Q_d = \sum_{i=k}^N C_N^i \prod_{j=1}^i P_{d,j} \prod_{k=1}^{N-i} (1 - P_{d,k})^{N-i}$$

$$Q_f = \sum_{i=k}^N C_N^i \prod_{j=1}^i P_{f,j} \prod_{k=1}^{N-i} (1 - P_{f,k})^{N-i} \quad (6)$$

其中, N 表示参与协作感知的感知节点数。

“K”秩法是介于“与”准则和“或”准则之间的一种方式, K 值的大小与检测性能直接相关。当 $K=1$ 或 N 时, “K”秩法分别等效于“或”准则和“与”准则^[7]。

“与”准则、“或”准则和“K”秩法均属于传统的硬判决协作频谱感知, 实现简单。在对感知用户的处理上是完全信任, 等权重, 如果系统中存在偏差较大的感知用户或不可信用户, 可能会造成合成结果失效。

4 基于信任度的协作感知

很多文献从各个角度对协作感知技术展开研究^[7-16], 但

一般的协作感知算法中, 感知用户的测量结果被完全信任, 在处理一些偏差较大的本地检测时, 以相同的权重来分配冲突信息, 从而使得合成结果存在失效问题^[1]。这样处理不利于对实际情况做出客观判别, 从而导致检测结果受主观因素的影响较大。

为提高频谱感知的检测性能, 本文提出一种基于信任度的协作频谱。这种算法基于对影响检测性能的几种主要因素的分析, 对本地检测结果进行预处理, 以提高参与融合决策的感知用户的性能, 实现整体检测性能的提升。

4.1 影响协作感知性能的主要因素

在实际应用中, 多用户分布式协作检测的性能与很多因素密切相关, 如参与协作感知的用户特征、信道条件以及融合中心的决策方法等^[6]。下面以能量检测法为例, 分析影响受信用户检测性能的主要因素。

(1) 感知用户特征

协作感知中, 执行本地检测的感知用户是参与合作的主体, 感知用户的位置、数量和行为等特征都将直接影响系统的整体检测性能^[6]。

在协作感知中, 能以正常、积极、合作的行为方式参与协作感知的感知用户被认为是受信用户。

在一般的协作感知算法中, 都认为感知用户能以正常、积极、合作的方式参与协作检测。但在实际应用中, 可能会存在一些感知用户由于设备损坏或工作环境恶劣造成的机械故障, 而导致检测行为失效, 通常表现有两种: 一种是常 0 (always no) 用户, 即总是判定授权用户不存在; 另一种是常 1 (always yes) 用户, 即总是判定授权用户存在。

常 0 用户的存在降低了协作频谱感知的检测概率, 造成感知用户在存在授权用户的情况下使用频谱资源, 干扰了授权用户的正常通信; 常 1 用户的存在降低了协作频谱感知的虚警概率, 造成感知用户在不存在授权用户的情况下也不能使用频谱资源。

除了失效用户外, 还可能存在干扰用户, 以不确定方式干扰正常协作检测的感知用户, 需要对其进行甄别, 以防止其对协作检测性能的影响。

(2) 信噪比

按照频谱感知二元假设模型采用能量检测法时, 定义:

$$T(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (7)$$

由于 $x(n)$ 服从高斯分布, 并且 $T(x)$ 是 N 个高斯变量平方和的均值, 所以 $T(x)$ 服从自由度为 N 的卡方分布。根据



中心极限定理,当 N 足够大 ($N \gg 1$) 时,卡方分布将近似于整体分布,此时,检测统计量遵从以下分布:

$$T(x) \sim \begin{cases} H_0: N(\sigma_v^2, 2\sigma_v^4) \\ H_1: N((1+\gamma)\sigma_v^2, \frac{2(1+2\gamma)^2\sigma_v^4}{N}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\gamma = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_v^2}$ 表示接收信号的信噪比(SNR)。

图1对6个信噪比不同的感知用户的检测性能进行对比,6个感知用户的信噪比分别为-20 dB、-18 dB、-15 dB、-12 dB、-10 dB和-8 dB,噪声为高斯白噪声,采样点为10 000点。

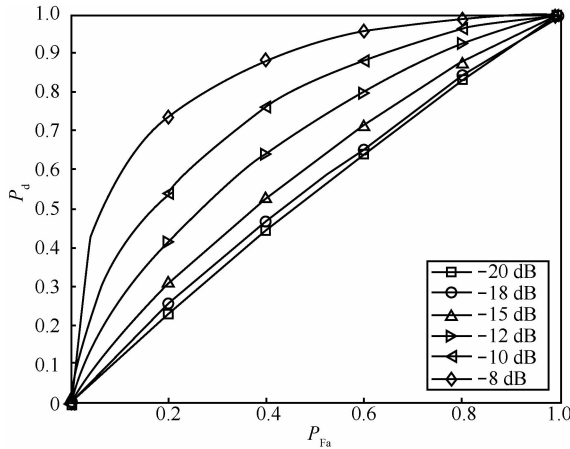


图1 不同信噪比用户的检测性能

由图1可以看出,授权用户的检测性能与传输过程中信道的信噪比密切相关。在虚警概率相同的情况下,信噪比高的感知用户的检测概率更高。

4.2 算法描述

为了提高感知性能,本文采用协作感知,协作感知的系统模型如图2所示。

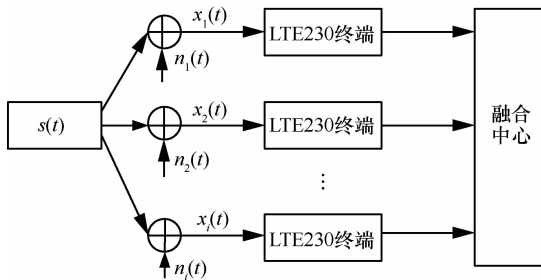


图2 协作感知系统模型

各感知用户的虚警概率和检测概率分别为:

$$\begin{cases} P_{f,i} = P(x_i > \lambda | H_0) \\ P_{d,i} = P(x_i > \lambda | H_1) \end{cases} \quad (9)$$

在各感知用户本地检测的基础上,通过对检测结果的汇聚和融合,实现多个本地感知用户的协作感知。

为提升系统的检测性能,考虑对参与感知的LTE230用户进行预处理,剔除不受信的感知用户,选择信任度高的若干个感知用户参与协作感知;在协作感知过程中,根据感知用户的信噪比设定权值,进行数据融合,并得到最终的判定结果。协作频谱感知流程如图3所示。

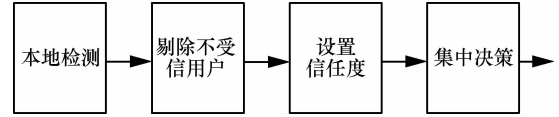


图3 基于信任度的协作频谱感知流程

4.2.1 本地检测

协作频谱感知算法建立在本地检测的基础上,本地检测选择最简单易行的能量检测法。能量检测算法是一种基于功率的检测算法^[15],通过测量一段观测空间(频域或时域)内接收信号的总能量来判断是否存在授权用户的信号,是一种非相关的次优检测算法^[16]。

设能量判决门限为 λ ,则LTE230终端根据以下判决条件判断是否存在数传电台的信号:

$$\begin{cases} H_0: T(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 < \lambda \\ H_1: T(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \geq \lambda \end{cases} \quad (10)$$

判决器将检验统计量 $T(x)$ 与预定判决门限 γ 进行比较并做出判决,可以得到LTE230系统的虚警概率为:

$$P_f = P(T(x) > \gamma | H_0) = Q\left(\frac{\lambda - \sigma_v^2}{\sigma_v^2 \sqrt{2/N}}\right) \quad (11)$$

检测概率为:

$$P_d = P(T(x) > \gamma | H_1) = Q\left(\frac{\lambda - (1+\gamma)\sigma_v^2}{\sqrt{\frac{2(1+2\gamma)}{N}} \sigma_v^2}\right) \quad (12)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 表示整体高斯互补累积函数。

4.2.2 剔除不受信用户

由于感知用户特征影响检测的性能,在本地检测的基础上,需要剔除非可信用户,提高后续协作感知的可靠性。

假设干扰用户的检测概率为 $P_d = P(H_u | H_1)$,其中 H_u 表示干扰用户向融合中心传送230数传电台信号是否存在的判决结果, H_1 表示230数传电台信号真实存在。由于干扰用户的判决结果不是来自于对230数传电台信号的检测,与230数传电台是否存在并不相关,因此干扰用户的检测概率可

以表示为:

$$P_d = \frac{P(H_t|H_t)}{P(H_t)} = P(H_t) = P_t \quad (13)$$

同理, 干扰用户的虚警概率可以表示为:

$$P_d = \frac{P(H_{0t}|H_0)}{P(H_0)} = P(H_{0t}) = P_t \quad (14)$$

从以上分析可知, 干扰用户按照一定的概率判定授权用户是否存在, 它的检测概率和虚警概率由于干扰用户本身概率决定, 并且检测概率等于虚警概率。

考虑到同一门限值下, 有 230 数传电台时的功率值会大于仅有噪声时的功率值, 因此可用 P_d/P_t 进行判断干扰用户的存在。

$$\begin{cases} \text{可信用户: } \frac{P_d}{P_t} > 1 \\ \text{干扰用户: } \frac{P_d}{P_t} \leq 1 \end{cases}$$

通过比较各 LTE230 终端的虚警概率和检测概率, 剔除失效用户和干扰用户。

4.2.3 设置数据源可信度

由于并不是参与协作感知的用户数越多, 检测性能就越好。实际的检测性能与参与感知的用户质量有关。对性能高的感知用户赋予更高的信任度将提升协作感知的整体性能。当参与协作感知的用户数量过大时, 融合中心需要的计算量很大, 时间较长。因此, 根据实际情况, 选择其中信任度较高的感知用户。

考虑各感知用户与融合决策中心以及本地检测之间的相互关联性对协作感知组合结果的影响, 参照参考文献^[5], 引入 Josselme 等人提出的证据间距离函数。定义认知用户可信度的可靠性系数为:

$$d_i = \mu_{i1} - \mu_{i0} = \gamma_i \quad (15)$$

其中, μ_{i1} 为第 i 个感知用户在有授权用户时接收信号的均值, μ_{i0} 为第 i 个感知用户在不存在授权用户时接收信号的均值, γ_i 为第 i 个 LTE230 感知用户接收信号的信噪比。

4.2.4 集中决策

将可信度的可靠性系数归一化后, 可得各认知用户可

信度的权重为 $w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}$, 根据该权重进行加权融合计算,

并得到最终的检测结果。

$$\begin{cases} H_0: \sum_{i=1}^N w(i) < 0.5, & i=1, 2, \dots, N \\ H_1: \sum_{i=1}^N w(i) \geq 0.5, & i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (16)$$

5 仿真结果及分析

为有效评估基于信任度协作感知算法的性能, 将检测性能与“与”准则、“或”准则、“K”秩法等协作感知方式进行仿真比较。仿真环境包括 1 个 230 数传电台 (授权用户)、10 个 LTE230 终端 (感知用户)、1 个数据融合中心单元。假设噪声为 AWGN, 授权用户信号服从高斯分布, 采样点数 $N=10\ 000$ 。

图 4 中, 10 个 LTE230 感知用户与 230 数传电台发射机之间的信噪比依次为 -20 dB、-20 dB、-20 dB、-15 dB、-15 dB、-15 dB、-12 dB、-12 dB、-12 dB、-10 dB, 分别采用基于信任度的协作感知算法和常用的“与”准则、“或”准则和“K”秩法进行性能比较。从图 4 中可以看出, 基于信任度的协作算法性能最优, 在虚警概率相同的情况下, 获得的检测概率最高。

图 5 中, 依然是对 10 个 LTE230 感知用户进行协作感

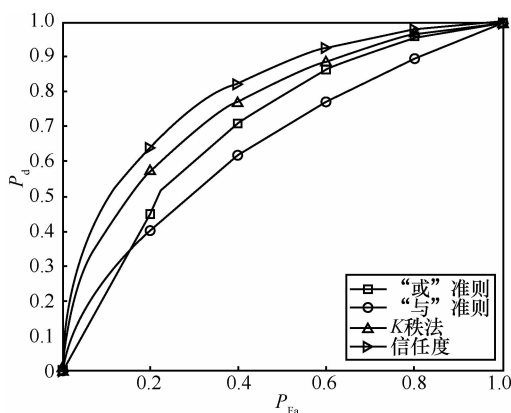


图 4 基于信任度协作感知算法的性能比较 I

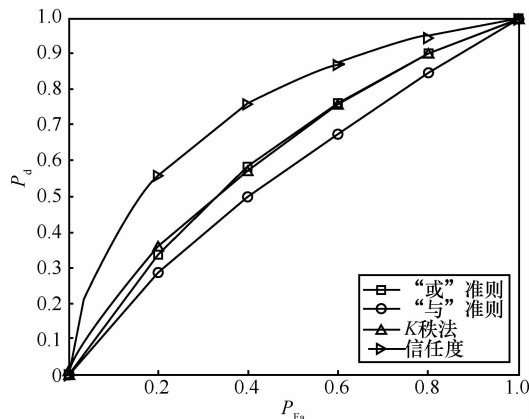


图 5 基于信任度协作感知算法的性能比较 II



知,设感知用户1的信噪比为-10 dB,其余9个感知用户的信噪比均为-20 dB,分别采用以上几种方法进行比较。从图5中可以看出,当各通道条件差距较大时,基于信任度的协作感知优势更加明显。

6 结束语

针对新型电力无线宽带系统在推广应用阶段可能面临的频谱冲突问题,本文提出了一种基于信任度的加权协作频谱检测算法。通过分析不同感知用户对协作感知性能的影响,提出先剔除影响检测性能的失效用户和干扰用户,选择信任度高的感知用户参与协作感知,并给出失效用户和干扰用户的判定原则;最后根据感知用户信噪比对检测性能的影响,对应设定各认知用户可信度的权重,并对此权重系数进行数据融合和判决。仿真结果表明,相比传统的硬判决协作频谱检测方法,本文提出的算法获得的检测结果更有效。

参考文献

- 1 刘海燕,赵宗贵,巴宏欣.一种基于加权证据合成的多传感器目标识别方法.解放军理工大学学报,2005,6(6):521~524
Liu H Y, Zhao Z G, Ba H X. Multisensor target identification method based on weighted evidence combination. Journal of PLA University of Science and Technology, 2005, 6(6): 521~524
- 2 李转,任旭虎.基于信任度函数的认知无线电频谱感知算法研究.电子技术应用,2012,38(6):108~110
Li Z, Ren X H. A research on wireless spectrum sensing algorithm based on belief degree function. Application of Electronic Technique, 2012, 38(6): 108~110
- 3 杜晓,刘维亨,杜茜等.一种新的加权证据组合方法.弹箭与制导学报,2008,28(3):271~274
Du X, Liu W T, Du Q, et al. A new weighted evidence combination method. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(3): 271~274
- 4 王鹏,许成谦.基于信噪比的合作频谱感知技术.燕山大学学报,2011,35(1):91~94
Wang P, Xu C Q. Cooperative spectrum sensing technology based on signal to noise. Journal of Yanshan University, 2011, 35(1): 91~94
- 5 杨风暴,王肖霞.D-S证据理论的冲突证据合成方法.北京:国防工业出版社,2010
Yang F B, Wang X X. Combination Method of Conflictive Evidences in D-S Evidence Theory. Beijing: National Defense Industry Press, 2010
- 6 郭彩丽,冯春燕,曾志民.认知无线网络技术及应用.北京:电子工业出版社,2010
Guo C L, Feng C Y, Zeng Z M. Cognitive Radio Network Technologies and Applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010
- 7 宋志群,刘玉涛,王荆宁.认知无线电技术及其应用.北京:国防工业出版社,2012

- Song Z Q, Liu Y T, Wang J N. Cognitive Radio Technologies and Applications. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- 8 Peng Q H, Zeng K, Wang J, et al. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context. Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'02), Piscataway, NJ, USA, 2006: 1~5
- 9 Wang C L, Chen H W, Chou Y R. A credibility based cooperative spectrum sensing technique for cognitive radio systems. Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, Hungary, 2011
- 10 Tevfik Y. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1):116~130
- 11 Xiao L, Liu K, Ma L. A weighted cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. Proceedings of 2010 International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA), Kunming, China, 2010
- 12 李佳俊.认知无线电中协作频谱感知技术研究(硕士学位论文).北京交通大学,2012
Li J J. Cooperative spectrum sensing in cognitive radios (master dissertation). Beijing Jiaotong University, 2012
- 13 曹开田.认知无线电中合作频谱感知方法研究(硕士学位论文).南京邮电大学,2011
Cao K T. Research on cooperative spectrum sensing algorithms for cognitive radios (master dissertation). Nanjing University of Post & Telecommunications, 2011
- 14 Niyato D, Hossain E. Cognitive radio for next-generation wireless networks: an approach to opportunistic channel selection in IEEE 802.11-based wireless mesh. IEEE Wireless Communications, 2009, 16(1): 46~54
- 15 Zeng Y H, Liang Y C, Hoang A T, et al. A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and solutions. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010
- 16 杨磊.认知无线电中若干关键技术的研究(硕士学位论文).大连理工大学,2012
Yang L. Research on some key techniques of the cognitive radio systems(master dissertation). Dalian University of Technology, 2012

[作者简介]



曹津平,女,国家电网公司信息通信分公司高级工程师,主要研究方向为信息通信、电力系统自动化等。

李伟,男,华北电网有限公司高级工程师,主要研究方向为信息通信、电力系统自动化等。

张翼英,男,国家电网公司信息通信分公司教授级高级工程师,主要研究方向为无线传感器网络安全、网络安全可靠性研究、网络追踪以及RFID技术等。