

# 基于能量效率的协作频谱感知时间优化

董守超<sup>1</sup>, 张晶<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;  
2. 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘要:**随着无线通信技术的飞速发展,人们对于频谱的需求不断增加。而频谱资源是一种有限的自然资源,其日趋紧张甚至枯竭已成为不争的事实,而真正要解决这种矛盾,必须对现在的频谱管理方法进行改进。认知无线电技术是解决频谱短缺的最有前景的技术之一。现有研究多着眼于提高认知无线电系统的频谱效率,但随着频谱效率的不断提高,系统能耗也呈现指数级增长,对于能量受限节点来说必须要提高系统能效。为此,针对协作频谱感知场景同时考虑认知用户非理想感知的情况,建立了认知无线电系统的能量效率模型;在此基础上,综合考虑频谱感知、频谱切换和数据传输过程,通过优化频谱感知时间,使得系统能效达到最大。仿真结果表明,存在最优的感知时间,使得系统能效达到最大。

**关键词:**认知无线电;协作频谱感知;频谱切换;能效

中图分类号:TP302

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)03-0176-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.037

## Optimization of Cooperative Spectrum Sensing Time Based on Energy Efficiency

DONG Shou-chao<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
2. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With the rapid development of wireless communication technology, there is increasing demand for spectrum. The spectrum has become increasingly tense and even exhausted because it is a limited natural resource. To solve this contradiction, the current spectrum management method must be improved. Cognitive Radio (CR) is one of the most promising techniques to solve the spectrum scarcity. Existing researches have focused on improving the spectrum efficiency of cognitive radio system. With the continuous improvement of the spectrum efficiency, the system energy consumption also presents exponential growth. For energy-constrained nodes, it is necessary to improve the energy efficiency. Therefore, the energy efficiency model of cognitive radio system is set up under the cooperative spectrum sensing scenario which exits misdetection and false alarm. Furthermore, the procedure of cooperative spectrum sensing, spectrum handoff and transmission is considered jointly. By optimizing the sensing time, the maximum energy efficiency of the system is achieved. The simulation results prove the existence of an optimal sensing time, which enables the system to achieve the maximum energy efficiency.

**Key words:** cognitive radio; cooperative spectrum sensing; spectrum handoff; energy efficiency

## 0 引言

随着无线用户数目的快速增长和无线业务的蓬勃发展,无线频谱资源作为一种不可再生的资源,其稀缺特性表现得越来越明显。研究发现,造成频谱短缺的最主要原因就是传统的固定频谱分配策略,认知无线电(CR)技术<sup>[1-5]</sup>就是在这样的情况下应运而生。在

认知无线网络中,认知用户(SU)会主动进行频谱感知<sup>[6-8]</sup>,寻找频谱“空洞”。若存在频谱“空洞”,认知用户就会接入授权频段来传输信息。然而,阴影效应和多径效应都使得认知用户的感知性能大为降低。为了减弱这些影响,学者们提出协作频谱感知方案<sup>[9-10]</sup>,协作频谱感知是指多个认知用户进行感知,并将感知信

收稿日期:2016-04-24

修回日期:2016-08-12

网络出版时间:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401235);江苏省自然科学基金项目(BK20130875)

作者简介:董守超(1991-),男,硕士生,研究方向为认知无线网络中的能效;张晶,副教授,研究方向为宽带无线技术、无线资源管理、动态频谱共享及绿色通信技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1630.052.html>

息发送到融合中心进行融合判决来得到最终的感知结果。协作频谱感知确实可以提高感知性能,但是多用户的协作感知必然意味着消耗更多能量,这对于能量有限的无线设备,比如用电池来供电的设备,就必须考虑如何在保证感知性能的前提下提高系统能效。

目前,如何提高认知无线网络能效已成为学者们研究的一个新热点。Guo C<sup>[11]</sup>等考虑在认知用户距离融合中心非常远的情况下,提出将认知用户按照地理位置分成一个个簇群,每个簇头将自己簇群里的感知信息压缩后再发送给融合中心,该方案通过减少认知用户的传输距离来减少能耗。由于所处环境的差异,并非所有认知用户的感知信息都具有可靠性,于是Chen Y<sup>[12]</sup>提出检测每个认知用户感知信息可靠度,具有较高可靠度的感知信息才发送给融合中心,通过减少发送感知信息的用户数来减少能耗。但上述文献只是减少了系统能量的消耗,而没有考虑到吞吐量的影响。于是就有学者将认知无线网络能效定义为网络中成功传输的平均比特数与平均能耗之比。Peng T<sup>[13]</sup>等通过对感知用户数、检测门限值、感知时间进行联合优化,从而使能量效率达到最大值,但该分析只适用单一信道的情况。Zhang J<sup>[14]</sup>等考虑了多信道情况下的能效问题,但是只适用于单一认知用户进行感知的情况。

针对现有工作的不足,文中研究了多用户协作感知情况下的认知无线电系统能效建模与优化问题。采用基于判决融合的协作频谱感知方案,融合中心采用多数表决原则作为融合准则<sup>[15]</sup>,并联合考虑协作频谱感知、频谱切换和传输过程,通过优化感知时间,使系统能效达到最大。

## 1 系统模型

### 1.1 认知无线电系统场景

认知无线系统场景如图1所示。

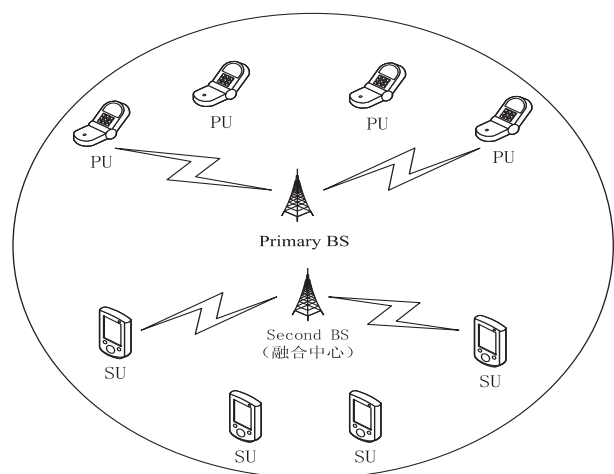


图1 认知无线网络系统场景

假设网络中只有两个信道,授权用户拥有信道接入优先权,并通过一个基站来提供接入控制,即当某个授权用户需要传输信息时由基站为其分配信道。认知用户通过认知基站进行接入控制,只有在授权用户不存在的情况下才能接入信道,而一旦检测到授权用户到达,就需要让出当前信道,并寻找其他空闲信道继续传输或等在当前信道的缓冲区。认知用户通过周期性频谱感知来检测授权用户是否存在,而授权用户不具备频谱感知能力,避免冲突的责任全都落到了认知用户身上。为了提高频谱感知性能,采用多用户协作频谱感知方案。

### 1.2 协作频谱感知模型

假设认知无线网络中有  $N$  个认知用户参与感知活动,并将其编号为  $1, 2, \dots, N$ , 每个认知用户带有两个传感器,可以同时且独立地感知两个信道的状态,并将感知结果发送至位于认知基站处的判决中心进行融合判决。假设所有认知用户拥有相同的定时同步系统,以保证频谱感知的同步性。参与协作的认知用户通过一个公共信令信道将感知结果传输到融合中心。

认知用户采用感知-传输时隙结构进行协作感知。首先,申请接入的认知用户及其周围的  $N-1$  个认知用户分别在时间  $\tau$  内独立地感知信道占用状态;然后,每个认知用户依次以时间  $r$  将感知结果传输到融合中心,由融合中心根据“多数表决”准则进行融合判决;最后,融合中心根据判决结果为需要接入的认知用户分配一个空闲信道。鉴于信令信道的唯一性,  $N$  个认知用户需要分时传送感知结果。“多数表决”融合判决准则为:对某一信道,若  $N$  个认知用户中有一半以上感知到授权用户存在,则判决该信道为授权用户占用;反之,若有一半以上认知用户检测到授权用户不存在,则判决结果为信道空闲。

假设系统中认知用户接收机到授权用户发射机的距离远大于认知用户收发端之间的距离,于是可以认为到达认知用户的信号经历了几乎相同的路径损耗。因此认知用户接收到信号的信噪比  $\gamma$  也就几乎是相同的。考虑认知用户采用能量检测方案<sup>[15]</sup>,对于第  $i$  个认知用户,给定一个能量检测门限值  $\varepsilon_i$ ,则每个认知用户的检测概率和虚警概率分别近似为:

$$P_{d,i} = Q\left(\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_n^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right), \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$P_{f,i} = Q\left(\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right), \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中,  $\sigma_n^2$  表示认知用户接收到的噪声功率;  $f_s$  表示感知时间内的采样频率;  $Q$  函数表达式为:  $Q(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt。$$

由式(1)、(2)可以看出,当所有的认知用户都取用一个相同的门限值  $\varepsilon$  时,所有认知用户的检测概率和虚警概率都相同,即可以统一表示为  $P_{d,1}$  和  $P_{f,1}$ 。

根据融合判决准则,多用户协作检测概率和虚警概率分别计算为:

$$P_d = \sum_{i=\lceil \frac{N}{2} \rceil}^N \binom{N}{i} P_{d,1}^i (1 - P_{d,1})^{N-i} \quad (3)$$

$$P_f = \sum_{i=\lceil \frac{N}{2} \rceil}^N \binom{N}{i} P_{f,1}^i (1 - P_{f,1})^{N-i} \quad (4)$$

其中,  $\lceil x \rceil$  表示不小于  $x$  的最小整数。

需要说明的是,参加协作的认知用户数目  $N$  默认为奇数,以避免出现“表决平手”现象。

### 1.3 频谱切换模型

认知系统采用被动频谱切换方案<sup>[16]</sup>:处于通信状态的认知用户及其邻近的  $N-1$  个认知用户在每一个感知周期的开始时间  $\tau$  内进行频谱感知并上报感知结果给融合中心,若融合中心判定授权用户出现在该认知用户的工作信道上,就查看另一信道是否空闲,若是,由认知基站通知认知用户切换到空闲信道,否则认知用户呆在当前信道的缓冲区中,等待下一个感知周期的到达。

下面计算信道的平均忙碌概率。假设授权用户和认知用户均以泊松过程到达和离开系统,信道 1 和信道 2 上授权用户到达率和离开率分别为  $\lambda_p$  和  $\mu_p$ , 认知用户的到达率和离开率分别为  $\lambda_s$  和  $\mu_s$ , 授权用户和认知用户在一个时隙中传输所花的时间分别为  $X_p$  和  $X_s$ , 即  $\mu_s = \frac{1}{E[X_s]}$ 。于是可以求出授权用户造成的信道忙碌概率为:

$$P_1 = \lambda_p E[X_p] \quad (5)$$

认知用户造成的信道忙碌概率为  $P_s$ <sup>[16]</sup>:

$$P_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_p + \mu_s} \left( 1 + \frac{\lambda_p}{\mu_s} \right) \quad (6)$$

最终,信道总的忙碌概率可计算为:

$$\rho = P_1 + P_s = \lambda_p E[X_p] + \frac{\lambda_s}{\lambda_p + \mu_s} \left( 1 + \frac{\lambda_p}{\mu_s} \right) = \lambda_p E[X_p] + \lambda_s E[X_s] \quad (7)$$

## 2 系统能量效率建模与优化

### 2.1 认知系统能量效率建模

在认知无线电系统中,根据协作感知结果以及信道的实际占用状况,每个时隙里授权用户和认知用户之间的活动可以分为六种可能的情况,对应时隙结构的三种应用场景,如图 2 所示。

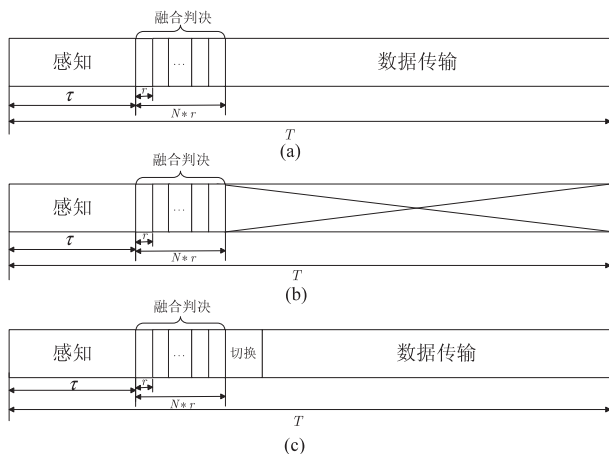


图 2 时隙结构的三种应用场景

由于前面已经假设系统中两个信道地位均等,下面以某一认知用户初始接入信道 1 为例来分析信道的占用情况。假设每个认知用户的感知功率为  $E_s$ , 发送功率为  $E_t$ 。鉴于切换时间开销  $t$  很短,而且切换功率开销较小,可忽略切换功耗。在感知/融合判决结束时刻,可能出现:

情况 1:授权用户不存在,且正确检测。此时对应帧结构(a)。则认知无线电系统消耗能量为  $\Phi_1(\tau) = N(E_s\tau + E_t r) + E_t(T - \tau - Nr)$ , 平均吞吐量为  $(T - \tau - Nr)C$ 。其中,  $C = \log_2(1 + \text{SNR}_s)$  表示认知用户的传输速率。

情况 2:授权用户不存在,但误检测,而另一信道空闲。此时对应帧结构(c)。因此认知无线网络所消耗的能量与场景 1 相同也为  $\Phi_1(\tau)$ , 系统吞吐量为  $(T - \tau - Nr - t)C$ 。

情况 3:授权用户不存在,但误检测,且另一信道也忙碌。此时对应帧结构(b)。认知无线网络所消耗的能量为  $\Phi_2(\tau) = N(E_s\tau + E_t r)$ , 系统吞吐量为 0。

情况 4:授权用户存在,且正确检测,而另一信道空闲。此时对应帧结构(c)。认知无线网络所消耗的能量为  $\Phi_1(\tau)$ , 系统吞吐量为  $(T - \tau - Nr - t)C$ 。

情况 5:授权用户存在,但误检测,另一信道也忙碌。此时对应帧结构(b)。认知无线网络所消耗的能量为  $\Phi_2(\tau)$ , 于是该场景中的吞吐量为 0。

情况 6:授权用户存在,但误检测。此时对应帧结构(a)。认知无线网络消耗的能量为  $\Phi_1(\tau)$ , 但认知用户与授权用户的传输出现碰撞,其传输的数据无法被成功接收,因此认知系统的吞吐量为 0。

认知无线网络中对各场景的分析结果总结在表 1 中。

其中,  $P_1$  表示授权用户存在的概率,可以用授权用户造成的忙碌概率表示,  $P_0 = 1 - P_1$ , 表示授权用户不存在的概率。于是,系统的平均吞吐量可以表示为:

$$\Psi(\tau) = \sum_{j=1}^6 p_j R_j = P_0(1 - P_f)(T - \tau - Nr)C + (1 - \rho)(P_0P_f + P_1P_d)(T - \tau - Nr - t)C \quad (8)$$

表1 认知无线网络在不同情况下的能耗和吞吐量

各情况发生概率 $p_j$	能耗 $\varphi_j$ /J	吞吐量 $R_j$ /(bits/Hz)
情况 1: $P_0(1 - P_f)$	$\Phi_1(\tau)$	$(T - \tau - Nr)C$
情况 2: $P_0P_f(1 - \rho)$	$\Phi_1(\tau)$	$(T - \tau - Nr - t)C$
情况 3: $P_0P_f\rho$	$\Phi_2(\tau)$	0
情况 4: $P_1P_d(1 - \rho)$	$\Phi_1(\tau)$	$(T - \tau - Nr - t)C$
情况 5: $P_1P_d\rho$	$\Phi_2(\tau)$	0
情况 6: $P_1(1 - P_d)$	$\Phi_1(\tau)$	0

系统的平均能耗可以表示为:

$$\Phi(\tau) = \sum_{j=1}^6 p_j \varphi_j = (P_0(1 - P_f) + P_1(1 - P_d) + P_0P_f(1 - \rho) + P_1P_d(1 - \rho))\Phi_1(\tau) + (P_0P_f\rho + P_1P_d\rho)\Phi_2(\tau) \quad (9)$$

定义认知系统能量效率为网络中平均吞吐量与平均能耗之比,于是得出系统的能效表达式为:

$$\eta(\tau) = \frac{\Psi(\tau)}{\Phi(\tau)} \quad (10)$$

## 2.2 能量效率优化问题

显然,认知无线电系统的能效为感知时间的函数。因此,可以通过调整感知时间来提高能量效率。考虑感知质量约束,可以建立如下的优化问题:

$$\max_{\tau} \eta(\tau) = \frac{\Psi(\tau)}{\Phi(\tau)} \quad (11)$$

对  $\eta(\tau)$  求导可得:

$$\eta'(\tau) = \frac{d\eta}{d\tau} = \frac{(X + Y)\Phi(\tau) - (A(NE_s - E_t) + BNE_s)\psi(\tau)}{\Phi^2(\tau)} \quad (12)$$

其中,  $X = -P_0(1 - P_f)C$ ,  $Y = -(1 - \rho)(P_0P_f + P_1P_d)C$ ,  $A = P_0(1 - P_f) + P_1(1 - P_d) + P_0P_f(1 - \rho) + P_1P_d(1 - \rho)$ ,  $B = P_0P_f\rho + P_1P_d\rho$ 。

可进一步证明:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \eta'(\tau) = \frac{(X + Y)\Phi(0) - (A + B)\psi(0)}{\Phi^2(0)} = \frac{(X + Y)(NE_s(T - Nr) + NE_t r)(NE_s T - NE_t r)}{\Phi^2(0)} > 0 \quad (13)$$

其中,假设  $E_s \ll E_t$ ,从而  $NE_s T - NE_t r < 0$ 。

$$\lim_{\tau \rightarrow T} \eta'(\tau) = \frac{(X + Y)\Phi(0) - (A + B)\psi(0)}{\Phi^2(0)} = \frac{[X(NE_s(T - Nr) + NE_t r) + Y(NE_s(T - Nr - t) + NE_t r) + Y(E_t t)]}{\Phi^2(0)} < 0 \quad (14)$$

即在  $\tau = 0$  附近,  $\eta(\tau)$  是增函数,在  $\tau = T$  附近,  $\eta(\tau)$  是减函数,且  $\eta(\tau)$  在  $(0, T)$  上是连续函数。因此  $\eta(\tau)$  在  $(0, T)$  上必定存在一个最大值。

## 3 仿真分析

通过仿真证明当协作感知用户数  $N$ ,授权用户到达率  $\lambda_p$ ,认知用户到达率  $\lambda_s$  给定之后,总是可以找到一个最优感知时间使得系统能量效率达到最大。在仿真中,假设  $T = 100$  ms,  $r = 0.5$  ms,  $\sigma_n^2 = 1$ ,  $f_s = 0.3$  MHz,  $t = 0.5$  ms。假设  $\text{SNR}_s = 20$  dB,则传输速率  $C = \log_2(1 + \text{SNR}_s) = 6.6582$  bits/(sec · Hz)。而传输功率  $E_t$  和感知功率  $E_s$  分别假设为 3 W 和 0.1 W。

给定授权用户到达率  $\lambda_p$ ,认知用户到达率  $\lambda_s$ ,对于不同的协作认知用户数  $N$ ,系统能效如图3所示。

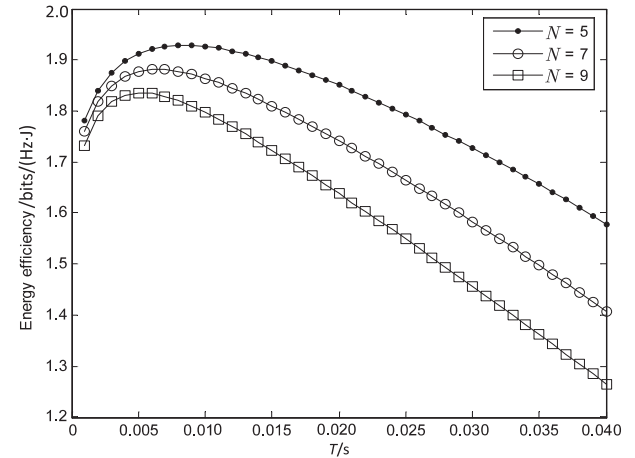


图3 在不同感知用户数下系统能效与感知时间的关系

开始时,随着感知时间的增加,系统能效也随之增加,说明随着感知时间增加检测概率变大,传输的信息能够被成功接收(不会受到授权用户的干扰)的概率也变大,因此传输消耗的能量是有用消耗的概率变大,系统能效也就随之增加。随着感知时间进一步增加,虽然感知性能还是会提高,但感知能耗也会增加,而且随着传输时间变短,系统吞吐量也会随之变小,导致系统的能耗反而出现了下降,此时已经不值得再提高感知性能。因此,当  $N$  给定以后,系统能效是随着感知时间的增加先变大再变小,总是存在一个最优感知时间。例如,当  $N$  取 7 时,最优感知时间大概在 8 ms 左右,系统能效达到最大的 1.87 bits/(Hz · J)。

## 4 结束语

文中联合考虑协作频谱感知、频谱切换和数据传输过程,建立能效模型,并通过理论分析证明了系统能效会随着感知时间的增大而先增大再减小。当系统中协作感知用户数,授权用户到达率,认知用户到达率等参数已知时,总是可以找到一个最佳的感知时间,使得



系统能效达到最大。仿真结果证明了理论分析的正确性。

#### 参考文献:

- [1] Mitola J I, Maguire G Q J. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio [D]. Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [3] 郭彩丽, 张天魁, 曾志民, 等. 认知无线电技术的国内外发展和研究现状[J]. 现代电信科技, 2006(6): 29-34.
- [4] 王 军, 李少谦. 认知无线电: 原理、技术与发展趋势[J]. 无线电技术与信息, 2007(7): 27-31.
- [5] 沈爱国. 认知无线电技术分析[J]. 电信快报: 网络与通信, 2014(7): 12-16.
- [6] 谭学治, 姜 靖, 孙洪剑. 认知无线电的频谱感知技术研究[J]. 信息安全与通信保密, 2007(3): 61-63.
- [7] 王颖喜, 卢光跃. 基于最大最小特征值之差的频谱感知技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2571-2575.
- [8] 赵东峰, 刘 涛, 周贤伟. 滤波器组的多滤波器联合能量频谱感知算法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(6): 1146-1149.
- [9] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C]//Conference re-

cord of the thirty-eighth Asilomar conference on signals, systems and computers. [s. l.]: IEEE, 2004: 772-776.

- [10] 卞 荔, 朱 琦. 基于数据融合的协作频谱感知算法[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 73-78.
- [11] Guo C, Peng T, Xu S, et al. Cooperative spectrum sensing with cluster-based architecture in cognitive radio networks [C]// Vehicular technology conference. [s. l.]: IEEE, 2009: 1-5.
- [12] Chen Y. Analytical performance of collaborative spectrum sensing using censored energy detection [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(12): 3856-3865.
- [13] Peng T, Guo C, Wang W B. Energy-efficient cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(4): 93-96.
- [14] Zhang J, Zheng F C, Gao X Q, et al. Sensing-energy efficiency tradeoff for cognitive radio networks [J]. IET Communications, 2014, 8(18): 3414-3423.
- [15] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [16] Wang C W, Wang L C, Adachi F. Performance gains for spectrum utilization in cognitive radio networks with spectrum handoff [C]//International symposium on wireless personal multimedia communications. [s. l.]: [s. n.], 2009.

(上接第 175 页)

程需求进行功能可控选择, 通过内置脚本, 自动执行相关函数, 修改配置数据和界面显示。基于可配置、可复用的脚本, 显著减少了装置二次开发工作量, 提高了研发效率和产品的通用性、适用范围, 已经在电力系统保护测控装置中大规模适用, 取得了较好的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 贺 敏, 陈宏君. 组件开发架构及在继电保护配置软件中的应用[J]. 软件工程, 2016, 19(1): 35-38.
- [2] 李 响, 刘国伟, 冯亚东, 等. 新一代控制保护系统通用硬件平台设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 52-55.
- [3] 孙振华, 高传发, 任华锋, 等. 新型基于 MPC8309 的微机继电保护平台[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(3): 105-109.
- [4] 陈翔宇, 王冬青, 李 刚, 等. 基于通用平台的智能变电站一体化设计和整合应用[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 58-62.
- [5] 郭 玮, 田录林, 张永良, 等. 基于嵌入式 PLC 软核的通用保护平台设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 122-126.
- [6] 陈宏君, 刘克金, 冯亚东, 等. 新一代保护测控装置配套工具软件设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 92

-96.

- [7] 徐 兵, 沈玉利, 谢仕义. 嵌入式 Web 服务器端脚本引擎设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(15): 3933-3935.
- [8] 屈景怡, 陈钟玉, 吴仁彪. 基于自定义脚本的适配参数系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(11): 3134-3139.
- [9] 张 强, 郭丽丽, 马振林. 基于模型自动判读的研究与实现[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(7): 17-20.
- [10] 何 啸, 麻志毅, 王瑞超, 等. 语义可配置的模型转换[J]. 软件学报, 2013, 24(7): 1436-1454.
- [11] IEC/TC57. Communication networks and systems for power utility automation-part 6: configuration description language for communication in electrical substation related to IEDs [S]. [s. l.]: [s. n.], 2009.
- [12] IEC/TC57. Communication networks and systems for power utility automation, part 7-4: basic communication structure-compatible logical node classes and data object classes [S]. [s. l.]: [s. n.], 2010.
- [13] MediniQVT project [EB/OL]. 2012. <http://projects.ikv.de/qvt>.
- [14] ATL flow project [EB/OL]. 2013. <http://opensource.urszeidler.de/ATLFlow>.