

# 认知无线电在智能电网中的研究进展及发展趋势

姚继明 梁云 李炳林 黄莉

(中国电力科学研究院 南京 211106)

**摘要** 认知无线电在智能电网中的应用将有效缓解无线通信中的频谱资源匮乏问题。认知无线网络将提供健壮和高效的通信架构来满足智能电网现在和未来无线通信发展的需求,用于智能电网的认知无线电测试平台不仅能测试应用的性能效果,而且可以发现更实际的问题。高效、可靠的系统通信架构对支撑智能电网双向通信具有十分重要的意义。对智能电网中基于认知无线电的测试平台、系统架构的最新研究进展进行了综述,在此基础上,探讨了下一步的发展趋势。

**关键词** 智能电网,认知无线,研究进展,发展趋势

**中图分类号** TN925 **文献标识码** A

## Research Progress and Development Trend of Cognitive Radio for Smart Grid

YAO Ji-ming LIANG Yun LI Bin-lin HUANG Li

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

**Abstract** Application of cognitive radio for smart grid will effectively address the problem of spectrum resource scarcity in the wireless communications. A cognitive radio network can serve as a robust and efficient communications infrastructure that can solve both the current and future energy management needs of the smart grid. Cognitive radio testbed for the smart grid is not only able to test the performance of application, but also can find more practical problems. An efficient and reliable communication architecture has great significance to support the two-way communication for the smart grid. The latest research progress of cognitive radio-based testbed and system architecture for smart grid is summarized, and, in this basis, this paper discusses the development trend of the next step.

**Keywords** Smart grid, Cognitive radio, Research progress, Development trend

## 1 引言

信息通信网络作为支撑智能电网(Smart Grid, SG)信息采集、监测控制、高级计量、双向交互等应用的重要手段,其性能的好坏将直接影响智能电网各应用的实际使用效果。光纤通信具有干扰小、速度快、容量大等优势,在智能电网通信网络的建设中发挥了十分重要的作用,但随着智能电网的发展,应用的范围将逐渐扩大,依靠光纤通信实现所有范围内的信息通信是不现实的。在此背景下,各类无线通信技术获取了应用契机。然而,无线通信技术的发展受限于频谱资源的匮乏,尤其在当前固定频谱资源分配的政策下,频谱资源利用率不高且分配给电力专用的无线频带资源很少,从长远的角度来看,必须要解决这一问题以促进应用于智能电网的无线通信发展。

认知无线电(Cognitive Radio, CR)<sup>[1]</sup>是一种智能无线通信系统,它能够感知外界环境,并使用人工智能技术从环境中学习,通过实时改变某些操作参数(传输功率、载波频率和调制技术等),使其内部状态适应接收到的无线信号的统计性变化,具有认知能力和重构能力两个基本特征,实现任何时间、任何地点的高度可靠通信,实现对频谱资源的有效利用。

将认知无线电技术应用于电力通信中,将有效解决电力无线通信发展的频谱资源瓶颈问题,提高频谱资源的利用效率、提高双向的数据传输速率、提升频谱资源的管理水平、延长数据的传输距离,推进智能电网的发展,提高智能电网建设水平。

国外最近几年积极开展认知无线电技术在智能电网应用中的研究,取得了一定的成果。本文将着重对基于认知无线电的测试平台和系统架构的最新研究进展进行综述,并探讨下一步的研究方向。

## 2 技术介绍

### 2.1 智能电网

智能电网就是以物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。

我国建设的坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础,以通信信息平台为支撑,具有信息化、自动化、互动化特征,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节,覆盖所有电压等级,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合的现代电

本文受国家 863 计划基金项目(2012AA050802),国家电网公司科技项目:电力光纤传感、信息感知与光纤无线融合通信技术研究资助。

姚继明(1987—),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统通信技术。

网。具备电网自愈、用户交互、设备兼容、质量管理、系统安全、信息集成、管理优化、资产优化、市场协调 9 大特征<sup>[2]</sup>。

## 2.2 认知无线电

认知无线电是一种智能的软件定义无线电(Software Defined Radio, SDR)技术,能够依靠与无线环境实时交互重新配置操作参数和功能参数,实现高效、可靠和动态的利用无线频谱资源。认知无线电技术可以实现非授权设备使用授权频段未使用的“频谱空洞”进行数据传输,同时不对授权用户造成干扰,从而解决频谱资源匮乏的问题。

2004 年 11 月,IEEE802.22 工作组成立,其任务是为认知无线电技术制定相应的标准。IEEE802.22 标准定义了无线区域网(Wireless Regional Area Network, WRAN)的物理层和 MAC 层的规范,其具体的技术参数如表 1 所列<sup>[3]</sup>。

表 1 CR 技术参数

参数	技术指标
覆盖半径(km)	30~100
信道获取方法	通过频谱感知获取空闲信道
信道带宽(MHz)	6, (7,8)
调制方式	OFDM
信道容量	18Mbps
用户容量	上行:384kbps 下行:1.5Mbps

## 3 研究进展

由于认知无线电的技术优势以及智能电网的无线通信的需求,国外开展了认知无线电和智能电网结合的应用研究工作,这些研究成果为我国的智能电网无线通信技术的发展提供了很好的参考价值。本节将对国外研究的用于智能电网的基于认知无线电的测试平台、系统架构的最新进展进行介绍。

### 3.1 测试台

认知无线电技术是软件无线电技术的进一步发展,是更智能的软件无线电,所以现有设计的用于软件无线电的硬件平台可以用来构建用于智能电网的认知无线电网络的节点的测试台<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.1 USRP2

在软件无线电和认知无线电领域,Ettus 研究机构提出的通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)和通用软件无线电外设 2(Universal Software Radio Peripheral 2, USRP2)被广泛用作硬件平台。USRP2 在 2009 年被提出,主要包括一个母板、一个或多个可选择的 RF 子板以及天线单元<sup>[5]</sup>。

USRP2 的主要优点是使用开源软件无线电技术,存在大量的开源软件资源,这将简化 USRP2 的使用。但是 USRP2 需要外设的计算设备来完成数据处理,这样就会带来一定的延时,对于认知无线电的双工通信是不利的;而且,随着 USRP2 的带宽增加,对外围计算设备的 CPU 的处理能力要求更高,这对实时数据处理是一个挑战。

#### 3.1.2 SFF SDR DP

由 TI 和 Xilinx 联合推出的小型化 SDR 开发平台(Small Form Factor Software Defined Radio Development Platform, SFF SDR DP)包括 3 个部分:数字处理模块、数据转换模块以及 RF 模块<sup>[6]</sup>。

SFF SDR DP 的两个主要优点是:1)硬件平台尺寸较小,容易移动;2)支持双工通信。但同样存在两个缺点:1)技术能

力受限,且不易升级来满足认知无线网络的需求;2)响应时间延迟较大,一般固定在 10ms,这样的延迟不能满足认知无线电系统要求,会导致系统性能降低。

#### 3.1.3 WARP

由美国莱斯大学研发的无线开放接入研发平台(wireless open-access research platform, WARP)包括 1 个 FPGA 板和 1~4 个 RF 板。覆盖 2 个频段,分别是 2400~2500MHz 和 4900~5875MHz,带宽上限是 40MHz<sup>[7]</sup>。

WARP 平台的优势之一是小型化的独立硬件平台,方便移动;优势之二是物理层和 MAC 层可以在一个 FPGA 上实现,和“FPGA+DSP/ARM”结构相比,系统设计更简单,而且可以有效降低延时。但是,WARP 上的 FPGA 在满足同时发射和接收功能上面还存在不足,也即不能很好满足双工通信。

#### 3.1.4 Sora

微软研究院提出了一种软件无线电平台(software radio, Sora)。Sora 主要由一个无线控制板(Radio Control Board, RCB)和一个可选择 RF 板构成,其中,RF 板和一个多核外围计算设备协同工作<sup>[8]</sup>。

Sora 是一个面向计算机的平台,主要优势体现在提供 RF 板和外围主机之间的高吞吐量接口,但这样的结构也存在相应的缺点。其一,计算过程由主机完成,这就需要主机能够提供所有功能的实时运行支持;其二,多核编程和加速调试也比较困难,而且,在一台主机上实现双工通信比较困难;其三,此种结构缺乏移动性特性。

#### 3.1.5 用于智能电网的认知无线电平台

鉴于以上平台都存在一定的测试局限性,美国田纳西科技大学在 2009 年中旬提出了用于智能电网的认知无线网络测试台。其目标是实现认知无线电和智能电网的融合。其结构如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

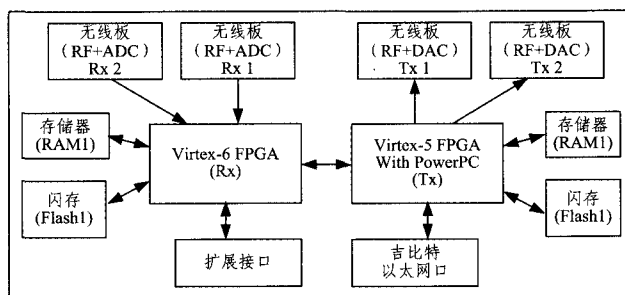


图 1 用于智能电网的认知无线电平台结构

整个结构包括两个 FPGA,是平台的核心组成部分,实现物理层和 MAC 层的功能。其中 Virtex-5 FX FPGA 实现 MAC 功能,物理层功能由两个 FPGA 共同完成。Virtex-5 FX FPGA 与 1~2 个无线板连接,提供无线发送链路,并同存储器、闪存和吉比特以太网口双向连接。Virtex-6 FPGA 与 1~2 个无线板连接,提供无线接收链路,并同存储器、闪存和扩展接口双向连接,扩展接口可以接入外围设备提高计算能力。

这种结构具有独立的、强大的计算能力,满足移动性需求,降低了系统响应时延,而且能够实现灵活的双工通信,满足智能电网的应用需求。

## 3.2 系统架构

### 3.2.1 功能架构

基于上述描述的用于智能电网的认知无线电平台以及现

有的 RF 板,用于网络测试的节点可以通过图 2 的功能架构来进行实现<sup>[4]</sup>。

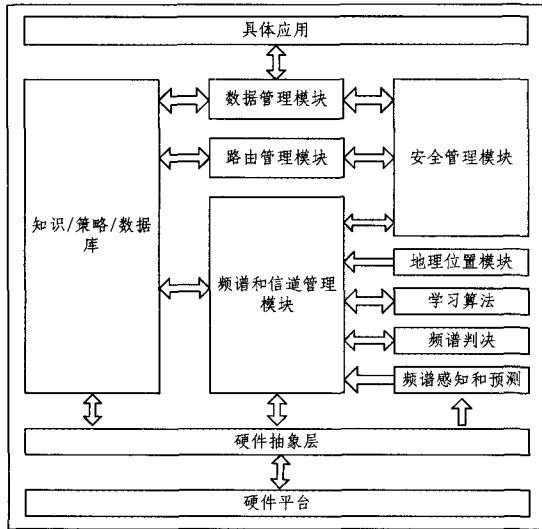


图 2 功能架构

其中,硬件抽象层是一个封装接口,用于屏蔽特定的硬件细节,提供数据收发通道。频谱和信道管理模块所有频谱和信道相关的资源,比如,链路、频率和调制方法等。该模块还与一些功能模块进行交互,具体如下:频谱感知和预测模块提供可用频带信息,频谱判决模块使用判决算法判决哪些频带可用、何时可用,学习算法模块可以作为一个独立模块依靠输入信息进行学习和推理,地理位置模块输出节点的经纬度信息。频谱和信道管理模块能够根据位置信息加载来自知识/策略/数据库的先验信息,路由管理模块使用路由算法来选择用于发射和中继数据包的最佳路由,数据管理模块组织所有来自上层应用和中继的数据,安全管理模块为数据管理、路由管理、频谱和信道管理模块提供加密和解密服务。

### 3.2.2 分层通信架构

文献[9]提出了用于智能电网的基于认知无线电的分层通信架构。如图 3 所示,HAN(home area network)负责不同智能终端之间的通信,满足能效高效管理和需求响应的需求; NAN(neighborhood area network)连接多个 HAN 到本地接入点,实现信息的向上传输,是 HAN 和 WAN 连接的纽带; WAN(Wide area network)提供 NAN 和公共系统之间用于传输信息的通信链路。

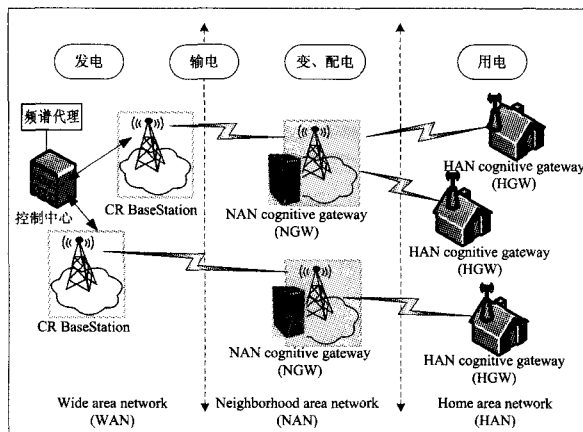


图 3 分层通信架构

#### 1) HAN 中的认知通信

使用认知无线电技术的家域网的通信将实现动态的频谱资源共享。HAN 认知网关(HAN cognitive gateway, HGW)具有自配置或者高级认知功能从而自治地适应不同的室内无线技术;HGW 能够智能化地与无线环境进行交互,自适应地连接并改变发射机参数。HGW 能够主动感知空闲频谱资源加以利用,提供最佳数据速率,同时不对其他通信产生干扰。HGW 管理 HAN 网络中的通信设备接入网络、信道和地址分配、协同设备之间的通信,实现频谱资源共享,缓解室内频谱资源匮乏的状况。

#### 2) NAN 中的认知通信

使用认知无线电技术的邻域网的通信将实现频谱混合动态接入。在基于认知无线电技术的邻域网中,提出了一种新的混合动态频谱接入算法(hybrid dynamic spectrum access, H-DSA)来提高频谱利用率。传统情况下,NAN 认知网关(NAN cognitive gateway, NGW)和 HGW 之间的通信使用付费的授权频带,然而,智能电网下的大量数据的传输需求使有限的授权频带不能满足通信要求,在这种情况下,多个 HGW 需要使用非授权接入的方法来提高 NAN 的容量和吞吐量。在非授权接入情况下,HGW 和 NGW 可以作为次要用户,它们之间的通信链路以机会接入的方式建立在非授权频带上。通过此方法,HGW 和 NGW 之间的通信以一种有效的方式建立,两者之间的信息传输以一种混合接入的模式进行。

#### 3) WAN 中的认知通信

使用认知无线电技术的广域网的通信将实现最佳的频谱使用。每个 NAN 网络通过 WAN 网络与控制中心进行信息交互,在 WAN 网络中,NGW 不再是一个接入点,而是一个通过使用授权用户未用的空闲频谱与控制中心通信的认知节点。控制中心与 CR 基站进行连接,CR 基站管理 NGW 的通信。在实现 NGW 与控制中心连接的过程中,频谱代理在多个 NAN 共存的环境下进行授权频谱共享管理起着十分重要的作用,能够快速响应不同的信息容量需求,以一种有效的方法进行频带资源的分配,满足数据传输的需求。

## 4 发展趋势

由上节内容可知,认知无线电在智能电网中的应用研究取得了一定的成果,为下一步的继续研究提供了良好的研究氛围。本文认为,结合我国智能电网的发展现状和实际需求,认知无线电技术在智能电网方面的进一步研究将体现以下几个方面的发展趋势。

**更强的处理能力:**认知无线电技术的认知能力和重构能力离不开强大的处理能力支撑,处理能力将直接影响频谱判决的时间,进而影响通信设备之间的双向实时通信的性能,所以,通过设计合理的硬件结构和科学的软件架构来提高数据的处理能力将是未来的发展趋势。

**高效的压缩算法:**由于协同感知的大量数据通常都是有一定范围内的无线环境数据,数据之间存在着相关性,对不加处理的数据进行计算,不仅浪费计算资源也会增大延迟,所以,在不损失感知数据信息的条件下,研究高效的压缩算法将有利于更快的数据处理,是可以研究的方向之一。

**更低的处理延迟:**智能电网对实时性的要求更高,更低的处理延迟意味着更快的频谱接入,通信链路的建立时间更短,

(下转第 76 页)

### 3.2 实验结果与分析

群智能算法求解螺旋桨参数优化问题的计算结果与其他文献计算结果对比如表 2 所列。

表 2 计算结果比较

项目	文献			PSO		ABC	
	文献 [10]	文献 [9]	文献 [8]	初步设计	终结设计	初步设计	终结设计
直径 D(m)	4.78	4.77	4.77	4.77	4.78	4.77	4.82
航速 V <sub>S</sub> (kn)	15.48	15.41	15.41	15.41	15.69	15.41	16.05
盘面比 A <sub>e</sub> /A <sub>0</sub>	0.544	0.550	0.666	0.563	0.623	0.523	0.500
螺距比 P/D	0.683	0.685	0.875	0.765	0.698	0.665	0.687
进速系数 J	0.419	0.418	0.484	0.441	0.425	0.422	0.431
转速 N <sub>s</sub> (r/min)	155	155	134	147	155	153	155
敞水效率 η <sub>0</sub>	0.545	0.537	0.530	0.534	0.535	0.544	0.548

本文螺旋桨参数优化设计通过计算机编程实现,计算时间都不到一分钟,而且只要程序里修改初始设计参数,就能实现不同要求的螺旋桨设计,比起传统的手工图谱设计,大大提高了螺旋桨的设计效率。从表 2 可以看出,PSO 算法和 ABC 算法的优化结果都是令人满意的,特别是 ABC 算法,敞水效率比其他文献计算的敞水效率提高了很多,说明群智能算法解决螺旋桨参数优化设计问题高效且实用。

**结束语** 本文首先介绍了 PSO 算法和 ABC 算法的基本原理,并且给出了各自的算法流程;其次针对 B 型螺旋桨,在前人工作的基础上建立了螺旋桨的初步设计与终结设计的数学模型,将螺旋桨参数优化问题转化为带约束的非线性函数优化问题;然后采用罚函数的约束处理方法,将有约束优化问题转化为无约束优化问题;最后分别用 PSO 算法和 ABC 算法对问题进行优化求解,并将优化结果与其他文献结果进行比较,说明群智能算法解决此类问题不但能得到较高精度的

优化结果,而且具有较高的计算效率,是解决螺旋桨参数优化问题的一种实用方法。

### 参考文献

- [1] Colorania, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[C]// Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. 1991;134-142
- [2] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks, IV. Piscataway, NJ, 1995;1942-1948
- [3] 李晓磊,邵之江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J].系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38
- [4] Eusuffm M, Lansey K E. Optimization of Water Distribution Network Design Using Shuffled Frog Leaping Algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(3):210-225
- [5] 张超群,郑建国.蜂群算法研究综述[J].计算机应用研究,2011, 28(9):20-28
- [6] 魏东.约束直接搜索法求解螺旋桨参数优化设计问题[J].上海交通大学学报,1997,31(11):91-95
- [7] 冯峰,黄胜.人工神经网络在螺旋桨设计中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2002,23(2):1-4
- [8] 王广东,杨丽,余建星.基于改进进化算法的螺旋桨设计方法研究[J].船舶工程,2004,26(2):20-23
- [9] 张忠业,王言英.油船大侧斜桨的设计模型试验研究[J].船舶工程,1994(3):12-18
- [10] 王国强,盛振邦.船舶推进[M].上海:上海交通大学出版社,2007

(上接第 52 页)

这对提高实时性性能十分有利。所以,通过跨层优化、增强处理能力等手段实现更低的处理延迟也将是发展的趋势。

**健全的安全体制:**认知无线电的使用允许非授权用户使用授权用户的频带资源,这样就给无线通信系统以及智能电网的数据传输带来了一定的安全隐患,必须采用健全的安全体制来保证数据的安全、接入的安全和系统的安全。

**结束语** 认知无线电凭借其提高频谱资源利用率、提升频谱资源管理水平等技术优势在多个行业得到了应用研究。电力行业随着智能电网的发展对无线通信的需求更强,解决频谱资源匮乏问题意义重大。本文对国外关于认知无线电技术在智能电网中的相关研究成果的最新进展进行了阐述和分析,并结合我国智能电网发展的实际情况,探讨了下一步的研究方向。

### 参考文献

- [1] 王军,李少谦.认知无线电:原理、技术与发展趋势[J].中兴通讯技术,2007,13(3):1-4
- [2] 刘云浩.物联网导论[M].北京:科学出版社,2010
- [3] Ranganathan R, Qiu R, Hu Zhen, et al. Cognitive Radio for Smart Grid: Theory, Algorithms, and Security[J]. International

Journal of Digital Multimedia Broadcasting; Special Issue: Communications and Networking for Smart Grid: Technology and Practice, 2011; 1-14

- [4] Qiu R, Hu Zhen, Chen Zhe, et al. Cognitive Radio Network for the Smart Grid: Experimental System Architecture, Control Algorithms, Security, and Microgrid Testbed[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4):724-740
- [5] Ettus Research LLC [OL]. URL <http://www.ettus.com/>, 2010-07
- [6] Amiri K, Sun Y, Murphy P, et al. WARP, a unified wireless network testbed for education and research[C]// IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education, 2007. San Diego, CA, 2007; 53-54
- [7] Mango Communications[OL]. URL <http://www.mangocomm.com/>, 2010-09
- [8] Tan Kun, Liu He, Zhang Jian-song, et al. Sora: high performance software radio using general purpose multi-core processors[J]. Communications of the ACM, 2011, 54(1):99-107
- [9] Yu Rong, Zhang Yan, Gjessing S, et al. Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid[J]. IEEE Network, 2011, 25(5):6-14