

# 认知无线电研究进展及应用前景

罗丽平<sup>1,2</sup>, 秦家银<sup>2</sup>

1. 广西民族大学信息科学与工程学院, 南宁 530006
2. 中山大学信息科学与技术学院, 广州 510006

**摘要** 认知无线电被认为是解决频谱资源紧缺、提高频谱利用率的有效途径, 成为现代无线通信领域的研究热点之一。在广泛调研的基础上, 从频谱政策演进、网络与标准发展等方面综述了近 10 年来认知无线电的研究进展, 展望了认知无线电在智能电网、宽带蜂窝网、公共安全网和医疗体域网等新兴无线通信业务方面的应用前景, 并提出认知无线电领域未来的研究方向。

**关键词** 认知无线电; 频谱政策; 网络标准; 新兴无线业务

**中图分类号** TN92

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.012

## Research Progresses and Application Perspectives in Cognitive Radio

LUO Liping<sup>1,2</sup>, QIN Jiayin<sup>2</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China
2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

**Abstract** With the rapid growth of wireless communication services, the radio spectrum is becoming increasingly overcrowded. Cognitive radio is regarded as a promising approach to alleviate the spectrum shortage and improve the spectrum utilization. Thus, the cognitive radio recently becomes one of hot research sports in wireless communications area. Based on the extensive investigation, the research progresses made in cognitive radio during the past ten years are reviewed from the aspects of spectrum policy evolution, network structure and standard development, and the related work. The relevant literatures and the famous international research institutes that focus on the field of cognitive radio are listed. Then, the application prospects of cognitive radio are presented. It is shown that cognitive radio could provide spectrum resource for the emerging applications, such as smart grid networks, wideband cellular networks, public safety networks, and medical body area networks. The cognitive radio technology is able to promote the development of these new emerging communication services. In summary, cognitive radio has wide application prospects and is expected to be one of the 5G communication standards. Furthermore, the future research directions in the area of cognitive radio are put forward, which include robust spectrum sensing and cognitive relay networks based on multiple user cooperation. Therefore, a good guidance for the researchers in the field of cognitive radio is provided.

**Keywords** cognitive radio; spectrum policy; network standard; new emerging wireless service

### 0 引言

无线电磁频谱是一种宝贵的自然资源, 随着无线通信业务的飞速发展, 频谱需求量快速增长, 频谱资源显得越来越缺乏, 已成为制约无线通信发展的瓶颈之一。导致频谱资源紧缺的主要原因是僵硬的固定频谱分配政策造成了大量的频谱资源

浪费。因此, 迫切需要一种技术来解决开放频谱问题和提高频谱利用率。学者们进行了长期不断的探索, Mitola<sup>[1]</sup>于 1999 年首次提出了认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 的概念。2005 年, Haykin<sup>[2]</sup>从通信角度定义认知无线电是一个智能的无线通信系统, 能自动感知周围的无线环境, 实时调整内部无线电参数 (如

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61173148); 广东省产学研重大项目 (2010A090200057); 广州市科技计划项目 (11A11060133); 广西民族大学科研基金课题 (2011MDYB037)

作者简介: 罗丽平, 讲师, 研究方向为协作通信、认知无线电, 电子信箱: lping.luo@gmail.com; 秦家银 (通信作者), 教授, 研究方向为新一代移动通信技术, 电子信箱: issqj@mail.sysu.edu.cn

功率、频率、调制和编码方案等)以适应外部无线环境的变化,并保证在不对授权用户造成干扰的情况下利用空闲频谱资源进行通信。近 10 年来,认知无线电作为一种解决频谱资源紧缺和提高频谱利用率的有效手段备受学界和业界的关注。目前,对认知无线电的研究点多而分散,难以从总体上把握认知无线电的研究进展。此外,由于对认知无线电的研究还处于理论阶段,缺乏对认知无线电的感性认识,看不清其实际应用价值。研究和总结认知无线电技术的发展现状能帮助人们快速掌握认知无线电的研究动态。通过对认知无线电技术应用前景的展望,推动认识无线电的实际应用,促进通信产业的发展。

### 1 认知无线电的研究进展

认知无线电技术一经提出就备受关注,是无线通信发展史上一个新的里程碑。认知无线电技术的应用将为频谱管理者、频谱持有者和设备厂商带来新的发展契机,为终端用户带来更多带宽和无线业务服务,其发展历程主要体现在以下方面。

#### 1.1 频谱政策演进

软硬件技术的发展使在技术上避免系统间的干扰成为可能。为了解决频谱资源紧缺与频谱利用率低的矛盾,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)<sup>[3]</sup>开始推行了频谱政策改革,于 2005 年修改了《电波法》,提出采用认知无线电技术实现“开放频谱系统”。中国也积极响应频谱政策改革,将无线电监测作为工信部“十一五”规划的“12 大重点项目”之一,规划中指出“科学规划无线电频率和卫星轨道资源,按照国际无线电规则和社会发展需要及时修订频率划分规定,促进无线电新技术、新业务的发展”<sup>[4]</sup>。

#### 1.2 网络与标准发展现状

认知无线电技术使次用户(Secondary User, SU)可以与主用户共享频谱。因此,认知无线网络在结构上具有多样性,其通信系统可包括广播电视系统、蜂窝系统、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)、802.16 无线城域网(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)等,网络结构可以有基础设施的,也可以是自组织网(ad hoc)。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在 xG (Next Generation)项目中提出了一种基于认知无线电的下一代网络结构<sup>[5-6]</sup>,见图 1<sup>[6]</sup>。从水平方向看,该网络由主用户网络(Primary Network)和认知用户网络(xG Network)组成,主用户网络指现存的网络结构,认知用户网络结构可以采用有固定基础设施的和 ad hoc 2 种。从垂直方向看,该网络包括非授权频段(Unlicensed Band)和授权频段(Licensed Band)2 种频谱模式。在授权频段,主用户对该段频谱享有优先权,次用户的优先级低于主用户,只能以伺机的方式使用空闲频谱。在开放频段,主要包括 2.4GHz 和 5.8GHz 的工业、医疗、卫生(Industrial, Scientific and Medical, ISM)频段和 5GHz 的未授权(Unlicensed National Information Infrastructure, U-NII)频段,用户无需授权就可以使用。因此,有很多业务如 WLAN、蓝牙(BlueTooth)、紫蜂(ZigBee)等都工作在此频段,导

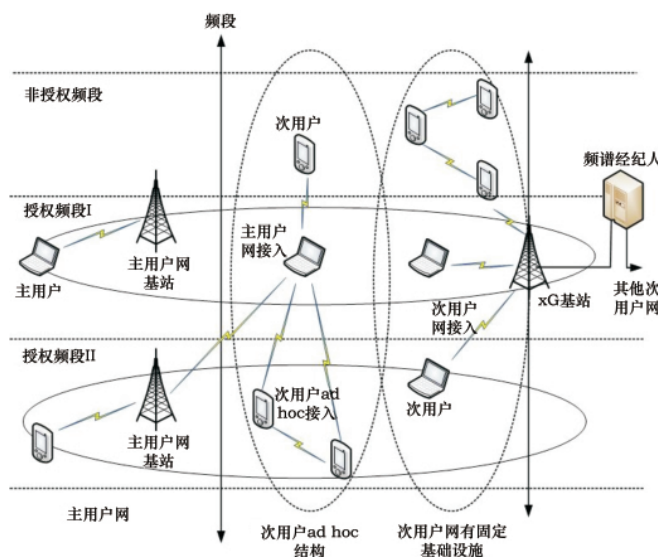


图 1 认知无线网络结构

Fig. 1 Architecture of cognitive radio network

致不同系统间干扰严重,而利用认知无线电技术动态接入频谱可以降低各系统间的干扰,提高频谱利用率。

为了推动认知无线电技术的发展,2004 年 9 月 IEEE 成立了 802.22 标准工作组<sup>[7]</sup>,提出了世界上第一个基于认知无线电技术的无线通信系统标准<sup>[8-9]</sup>,也称为无线区域网(Wireless Regional Area Network, WRAN)。目前,802.22 工作组已基本完成了技术需求规范的定制。由于大多数家庭和商业用户通过光纤和卫星来获得电视服务,许多地区的大量电视频道,即 54—862MHz 的 UHF/VHF 频段没有被充分利用,造成了频谱资源浪费。由于该频段具有良好的传播特性,覆盖范围能达到 33—100km,而且用于 802.22 的设备不需要牌照,能降低成本。因此,FCC 选择该频段作为 IEEE 802.22 标准的工作频段,为人口密度低、服务困难的地方,特别是农村和偏远地区提供无线宽带接入<sup>[10]</sup>。图 2 给出了 IEEE 802.22 的 WRAN 系统部署结构<sup>[10]</sup>,

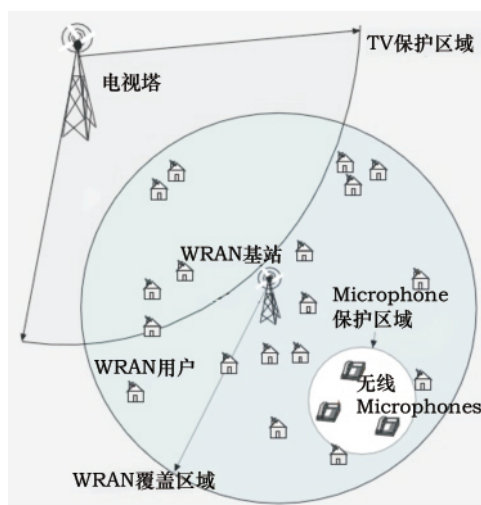


图 2 IEEE 802.22 WRAN 系统部署结构

Fig. 2 Deployment structure for IEEE 802.22 WRAN

其中主用户网络为广播电视(TV)网络和 FCC Part 74 无线麦克风(Microphones)业务<sup>[1-2]</sup>,WRAN 由基站和用户驻地设备(Customer Premises Equipment,CPE)组成,基站和CPE使用802.22协议进行通信。为避免对主用户的干扰,802.22标准包含了相应的物理层(PHY)和媒体接入控制层(Media Access Control,MAC)机制,便于进行频谱感知。

除了IEEE 802.22标准外,SCC41(IEEE P1900)也是一个重要的认知无线电技术标准,另外在WiFi(IEEE 802.11)、ZigBee(IEEE 802.15.4)和WiMAX(IEEE 802.16)中都不同程度地涉及到认知无线电技术<sup>[3]</sup>。

### 1.3 国内外研究现状

认知无线电技术受到全世界的广泛关注,各标准组织纷纷成立认知无线电项目组。国际电联ITU研究基于认知无线电的频谱共享技术;美国DARPA成立了xG项目组并开展动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access,DSA)关键技术研究,以提高不同通信系统标准间的协同工作能力和检测干扰的能力;FCC成立了专门的频谱任务工作组<sup>[3]</sup>,研究包括认知无线电在内的频谱管理政策。IEEE 802委员会除了成立802.22标准工作组以外,还组织了专门以认知无线电技术为主题的IEEE DySPAN(IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks)和IEEE CrownCom(IEEE International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications)国际会议。

国内外各大高校和科研院所也在从事相关研究。新加坡信息通信研究院Liang等<sup>[4]</sup>主要研究了物理层频谱感知问题,并且参与了IEEE 802.22标准<sup>[5]</sup>的制定。美国佐治亚理工Akyildiz的宽带无线网络实验室开发了基于OFDM传输技术的认知无线电平台<sup>[6]</sup>,提出频谱共享架构<sup>[6-9]</sup>,给出了xG认知网络结构<sup>[6]</sup>。美国维吉尼亚理工大学有2个研究群体在进行认知无线电技术的研究开发,文献[20]详细报道了Virginia理工在认知无线电领域的研究进展。美国加州大学Davis分校Zhao等<sup>[21-23]</sup>致力于基于认知无线电的动态频谱接入算法研究,主要研究了MAC层接入控制协议以实现动态频谱共享。香港科技大学Zhang等<sup>[24-26]</sup>主要研究跨层设计和频谱管理问题,Letaief等<sup>[27-28]</sup>主要研究认知无线电协作频谱检测和频谱共享问题。国家自然科学基金委员会和国家863计划从2006年开始资助关于认知无线电方面的研究项目,2008年国家自然科学基金委员会信息科学部在认知无线电领域设立重点项目群,从事该方面研究的高校主要有清华大学<sup>[29-31]</sup>、南京邮电大学<sup>[32-35]</sup>、电子科技大学<sup>[36-37]</sup>、浙江大学<sup>[38-39]</sup>、北京邮电大学<sup>[40]</sup>、中山大学<sup>[41-44]</sup>等。电子部第36研究所与重庆邮电大学合作开发了基于软件无线电平台的认知无线电频率搜索样机,国内移动通信设备厂商如华为、中兴等也正在对认知无线电相关技术的研究,希望能在下一代通信设备中应用。

### 1.4 未来研究方向

对认知无线电的关键技术,主要包括频谱检测和频谱共

享,目前还有许多课题有待深入研究。例如,(1)非高斯噪声情况下频谱检测问题的研究。由于已有的检测算法都是在高斯白噪声的前提下提出的,当噪声为非高斯时,已有算法的性能大大降低,因此健壮的频谱检测算法值得深入研究。(2)认知中继网络多用户协作频谱共享问题的研究。在认知无线电中,次用户的传输性能通常难以得到保障,协作中继技术能提供分集增益,从而提高次用户传输的可靠性。因此,认知中继网络中用户间的协作问题值得深入研究。此外,还有全分布式协作频谱检测、多载波聚合和同步等问题都有待研究。

## 2 认知无线电的应用前景

认知无线电技术在智能电网、宽带蜂窝网、公共安全网和医疗体域网(Medical Body Area Networks,MBANs)方面有广阔的应用前景<sup>[45]</sup>。空闲的广播电视频段(TV White Space,TVWS)能为这些新兴的无线业务提供带宽资源,降低建网成本。

### 2.1 智能电网

智能电网的概念由奥巴马政府的能源班子首先提出,后在世界各国得到响应。智能电网是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上,实现“电力流、信息流、业务流”高度一体化融合的现代电网。如图3<sup>[46]</sup>所示,智能电网主要由3个部分组成,即HANs(Home Area Networks)、FANs(Field Area Networks)和WANs(Wide Area Networks),其中HANs可以是WiFi、ZigBee或电力猫(HomePlug),WANs可以是基于IP的骨干网或宽带蜂窝网,而FANs采用何种接入技术还在研究之中。

在智能电网中,要求FANs的覆盖范围在几百m至几km,速率要求为10—100Kb/s。目前智能电网可使用900MHz的非授权频段,然而随着智能电表(smart meter)数的增加,该频段变得越来越拥挤。IEEE 802.15.4g工作组建议FANs使用700MHz—1GHz和2.4GHz频段,但是这个频段目前也是多种业务并存,如何对抗多个系统间的干扰是面临的难题。如果采用蜂窝网,则建设成本大,且蜂窝网本身也有频谱资源紧缺的问题。

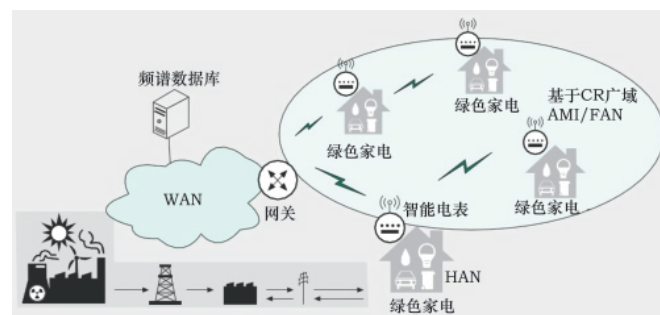


图3 智能电网结构

Fig. 3 Structure of smart grid networks

采用认知无线电技术可以有效解决FANs面临的困难。如图3所示,在基于CR的广域FANs(CR based wide area AMI/FAN)中,智能电表和网关(network gateway)通过安装CR设备可以动态利用TVWS频段,并采用mesh组网方式进行数据传

输。由于TV频段具有良好的传播特性,可以达到33—100km的覆盖范围,因此基于认知无线电的FANs具有覆盖范围大、免受拥塞及干扰、建网成本低等优点,可以满足智能电网的性能要求,能有效解决频谱资源紧缺的问题。

### 2.2 宽带蜂窝网

随着智能手机的应用和社区网、视频网(例如 Youtube、E-reader)等业务的兴起,蜂窝通信业务不再是单纯的语音业务和传统的 Email 及网页浏览等数据业务,人们希望能随时随地上网并享受大带宽的数据业务服务,这给运营商带来机遇的同时也带来了挑战。为了满足用户的业务需求,3GPP LTE (Long Term Evolution)、IEEE 802.16m WiMAX 及 4G LTE-Advanced 都在部署异构网,如图4所示<sup>[45]</sup>。在宏蜂窝网络下还部署了自组网形式的热点覆盖区域(hot spots)和实现家庭覆盖的微微蜂窝(femtocell)网,从而为用户提供高速、可靠的数据业务服务。然而,最新报告<sup>[46]</sup>显示到2014年宽带蜂窝网频谱资源赤字将达300MHz。利用认知无线电技术,伺机利用TVWS频段,不仅可以为蜂窝网带来新的可利用的频谱资源,还能解决异构网层间和层内的干扰<sup>[47]</sup>。

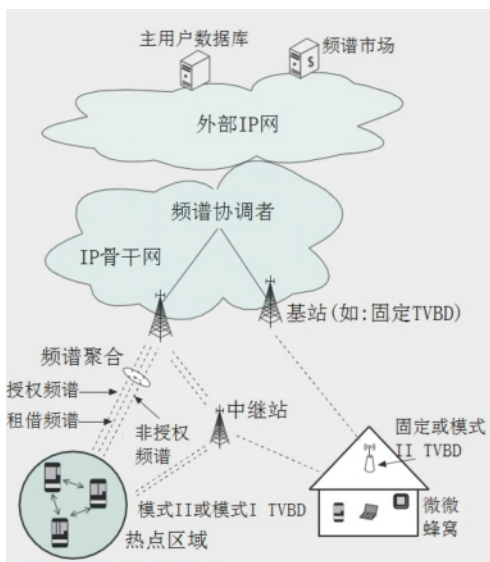


图4 宽带蜂窝异构网结构  
Fig. 4 Structure of wideband heterogeneous cellular networks

### 2.3 公共安全网

无线通信技术已广泛应用于公共安全网,并用来处理紧急事务如报警、火警和医疗急救等。为了尽快处理事故,使市民得到快捷的应急服务,公共安全工作者随身携带无线上网本、视频等设备用以随时随地接收语音信息、收发邮件、浏览网页、访问数据库、传输图片和收看视频等,从而提高工作效率。然而,用于公共安全网的频段非常拥挤,特别是在城市,而且不同应急部门的设备不兼容,缺乏统一标准,无法互联互通,导致公共安全工作效率低下。

为了应对以上难题,美国国土安全部在2008年7月发布

的国家应急通信计划中将认知无线电列入其中。应用认知无线电技术,公共安全工作者可以随时随地接入网络,如图5所示<sup>[45]</sup>。由于认知无线电设备具有感知外部环境和自适应的能力,用户之间可以互相协调,互相兼容,从而为公共安全提供可靠的网络服务。



图5 公共安全网结构  
Fig. 5 Structure of public safety networks

### 2.4 医疗体域网

近年来,无线通信技术开始应用于医疗卫生领域。医疗体域网 MBANs 是在人体安装传感器,用来监测病人的血压、血氧、心电图等重要信息,然后再通过无线通信网传送到医生办公室,如图6所示<sup>[48]</sup>。MBANs 的应用降低了病人受感染的风险,使病人可随意移动,提高其舒适感和护士的工作效率。由于医疗服务质量对病人安危有重要影响,对 MBANs 网有严格的服务质量(Quality of Service, QoS)要求,信息传输必须及时准确,因此 MBANs 需要工作在相对干净和富裕的频段。虽然 2.4GHz 频段划分给医疗业务使用,但该频段业务繁多,相互间干扰大,无法满足 MBANs 的 QoS 要求。2009 年 FCC 提出,在 MBANs

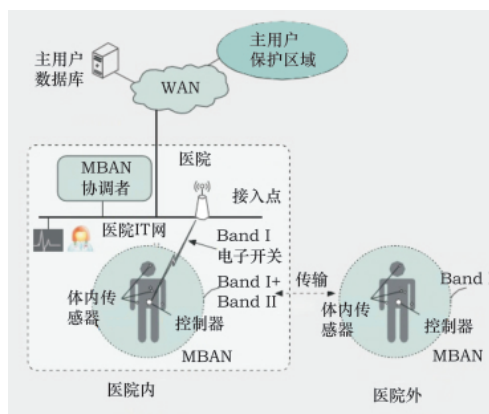


图6 医疗体域网结构  
Fig. 6 Structure of medical body area networks

中采用认知无线电技术机会利用 2360—2400MHz TVWS 频段,从而保证 MBANs 的 QoS 要求。

### 3 结论

认知无线电是当前无线通信领域的研究热点之一,深入调研认知无线电的研究现状是科研工作者展开相关研究的前提。本文从频谱政策演进、网络与标准发展和国内外研究现状方面总结了认知无线电的相关研究,并指出未来认知无线电领域的研究方向。通过阐述认知无线电在智能电网、宽带蜂窝网、公共安全网和医疗体域网的应用,可以看出,认知无线电具有广阔的应用前景,能够为新兴的无线通信业务提供可用的频谱资源。展望未来,认知无线电有望成为第 5 代移动通信的关键技术之一。

### 参考文献 (References)

- [1] Mitola J, Gerald Q, Maguire J R. Cognitive radios: Making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13–18.
- [2] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201–220.
- [3] FCC Spectrum Policy Task Force. Report of the spectrum efficiency working group[EB/OL]. [2002–11–15]. [http://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport\\_1.pdf](http://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf).
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 信息产业“十一五”规划[R]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2007.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. 15th plan of information industry [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2007.
- [5] DARPA XG Working Group. The next generation (XG) Architectural Framework V1.0 [EB/OL]. [2011–12–05]. [http://www.cce.gatech.edu/research/labs/bwn/CR12/reading/rfc\\_af.pdf](http://www.cce.gatech.edu/research/labs/bwn/CR12/reading/rfc_af.pdf).
- [6] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey [J]. *Elsevier Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127–2159.
- [7] Cordeiro C, Challapali K, Birru D, et al. IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios [J]. *Journal of Communications*, 2006, 1(1): 38–47.
- [8] Stevenson C, Chouinard G, Lei Z D, et al. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 130–138.
- [9] Cordeiro C, Challapali K, Birru D, et al. IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios[C]//Proc IEEE Int Symp DySPAN. Baltimore: IEEE Press, 2005: 328–337.
- [10] Liang Y C, Hoang A T, Chen H H. Cognitive radio on TV bands: A new approach to provide wireless connectivity for rural areas [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(3): 16–22.
- [11] Stevenson C R, Cordeiro C, Sofer E, et al. IEEE 802.22–05/0007r46 Functional requirements for the 802.22 WRAN standard [S]. Emmaus: WK3C Wireless LLC, 2005.
- [12] Hu W, Willkomm D, Abusubaih M, et al. Cognitive radios for dynamic spectrum access: Dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(5): 80–87.
- [13] Sherman M, Mody A N, Martinez R, et al. IEEE standards supporting cognitive radio and networks, dynamic spectrum access, and coexistence [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(7): 72–79.
- [14] 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.
- [15] Akyildiz I F, Li Y. OCRA: OFDM-based cognitive radio networks, broadband and wireless networking laboratory [R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [16] Lee W Y, Akyildiz I F. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(10): 3845–3857.
- [17] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 40–48.
- [18] Akyildiz I F, Lee W Y, Chowdhury K. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks[J]. *IEEE Network*, 2009, 23(4): 6–12.
- [19] Lee W Y, Akyildiz I F. A spectrum decision framework for cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(2): 161–174.
- [20] MacKenzie A B, Reed J H, Athanas P, et al. Cognitive radio and networking research at Virginia Tech[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(4): 660–688.
- [21] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3): 79–89.
- [22] Zhao Q, Tong L, Swami A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3): 589–600.
- [23] Chen Y, Zhao Q, Swami A. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(5): 2053–2071.
- [24] Zhang Q, Zhang Y. Cross-layer design for QoS support in multihop wireless networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(1): 64–76.
- [25] Jia J, Zhang Q, Shen X. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 106–117.
- [26] Lin P, Jia J, Zhang Q, et al. Dynamic spectrum sharing with multiple primary and secondary users [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1756–1765.
- [27] Zhang W, Letaief K B. Cooperative communications for cognitive radio networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 878–893.
- [28] Zhang W, Letaief K B. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 4761–4766.
- [29] 马志焱, 曹志刚. 认知无线网络用户合作机会接入方案的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 678–683.  
Ma Zhiyao, Cao Zhigang. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 678–683.
- [30] 滑楠, 曹志刚. 认知无线网络路由研究综述[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 910–918.  
Hua Nan, Cao Zhigang. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 910–918.
- [31] Bai B, Chen W, Cao Z. Low-complexity hierarchical spectrum sharing scheme in cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(10): 770–772.
- [32] 朱佳, 郑宝玉, 邹玉龙. 基于最佳中继选择的协作频谱感知方案研究[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 92–98.

- Zhu Jia, Zheng Baoyu, Zou Yulong. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(1): 92-98.
- [33] Zou Y, Yao Y D, Zheng B. Cognitive transmissions with multiple relays in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(2): 648-659.
- [34] Zou Y, Yao Y D, Zheng B. A selective-relay based cooperative spectrum sensing scheme without dedicated reporting channels in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(4): 1188-1198.
- [35] Zou Y, Yao Y D, Zheng B. A cooperative sensing based cognitive relay transmission scheme without a dedicated sensing relay channel in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 854-858.
- [36] 朱江, 徐斌阳, 李少谦. 一种基于马尔可夫决策过程的认知无线网络传输调度方案[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(8): 2019-2023.  
Zhu Jiang, Xu Binyang, Li Shaoqian. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8): 2019-2023.
- [37] 陈东, 李建东, 李维英, 等. 认知无线电环境下 MIMO-OFDM 系统的无线资源管理[J]. *电子学报*, 2007, 35(6A): 60-64.  
Chen Dong, Li Jiandong, Li Weiyang, et al. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6A): 60-64.
- [38] Chen Y, Yu G, Zhang Z, et al. On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2752-2761.
- [39] 毛小矛, 余官定, 仇佩亮. 认知无线电中的用户合作通信 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2009, 43(1): 111-116.  
Mao Xiaomao, Yu Guanding, Qiu Peiliang. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2009, 43(1): 111-116.
- [40] 周小飞, 张宏纲. 认知无线电原理及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2007.  
Zhou Xiaofei, Zhang Honggang. Principle and applications of cognitive radio [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2007.
- [41] 李东. 认知无线电系统中的频谱共享技术研究 [D]. 广州: 中山大学, 2010.  
Li Dong. Research on spectrum sharing techniques in cognitive radio systems[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [42] Li D, Dai X, Zhang H. Sidelobe suppression in NC-OFDM systems using constellation adjustment [J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(5): 327-329.
- [43] 罗丽平, 邱焕新, 张广驰, 等. 具有约束条件的认知无线网络最优频谱价格函数[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 562-566  
Luo Liping, Qiu Huanxin, Zhang Guangchi, et al. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 562-566
- [44] Luo L P, Zhang P, Zhang G C, et al. Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(7): 710-712
- [45] Wang J, Ghosh M, Challapali K. Emerging cognitive radio applications: A survey[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(3): 74-81.
- [46] Federal Communications Commission. Mobile broadband: The benefits of additional spectrum [R]. Washington: Federal Communications Commission, 2010.
- [47] Cheng S M, Lien S Y, Chu F S, et al. On exploiting cognitive radio to mitigate interference in macro/femto heterogeneous networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 40-47.

(责任编辑 孙秀云,代丽)

· 学术动态 ·



## “2012 颗粒材料计算力学会议”征文

由中国力学学会计算力学专业委员会主办的“2012 颗粒材料计算力学会议”拟于 2012 年 9 月 16—18 日在北京市召开。

征文范围: (1) 颗粒材料力学的基本理论: 颗粒材料的物理力学特征; 颗粒流体动力学; 颗粒材料中的流固耦合问题; 颗粒材料的相变特征及本构模型; (2) 颗粒材料计算力学的数值方法: 颗粒材料的宏细观力学模型及离散元方法; 离散元软件及脆性材料破坏; 颗粒力学大规模数值计算; 非连续变形分析(DDA)及应用; 基于粒子的计算方法; (3) 颗粒材料计算力学的应用及试验验证: 环境灾害中的离散元方法; 机械工程中的离散元方法; 岩土及土木工程中的颗粒力学; 农业及其他工程领域中的离散元方法; 颗粒计算中力学参数的试验验证。

摘要截止日期: 2012 年 3 月 15 日。

全文截止日期: 2012 年 5 月 31 日。

联系电话: 0411-84707212。

电子信箱: jjsy@dlut.edu.cn, mech@dlut.edu.cn。

会议网站: <http://sail.dlut.edu.cn/cmgm2012>。