

# 网络认知——从认知无线电到认知网络

王海涛<sup>1</sup> 张祯松<sup>1</sup> 宋丽华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (解放军理工大学信息管理中心 南京 210007)

<sup>2</sup> (解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

**摘 要** 认知无线电 (Cognitive Radio) 和认知网络 (Cognitive Network) 的提出和快速发展源于日益增长的网络可靠性、可用性和适应性要求。本文从当前网络面临的问题出发, 首先介绍了认知无线电的提出背景和技术特点, 并说明了认知网络的概念和内涵。然后, 归纳了当前有关认知网络研究的相关研究工作。在此基础上, 给出了一种通用的认知网络体系结构并对其资源管理方式进行了阐述。最后, 总结了全文并展望了今后工作。

**关键词** 认知无线电; 认知网络; 体系结构; 资源管理; 跨层设计

## Network Cognition – From Cognitive Radio to Cognitive Network

WANG Hai-tao<sup>1</sup> ZHANG Zhen-song<sup>1</sup> SONG Li-hua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (Information Management Center, PLAUST, Nanjing 210007, China)

<sup>2</sup> (College of Command Information Systems, PLAUST, Nanjing 210007, China)

**Abstract** Cognitive Radio (CR) and Cognitive Network (CN) are proposed to meet requirements of increasing network dependability, availability and adaptability. Aiming current network puzzles, background and technical traits of CR are introduced firstly and concepts of CN are explained. Then, relevant research works of CN are summed up. Based on above expatiation, general architecture of CN is given and its resource management mode is elaborated. Finally, conclusion is drawn and future works are prospected.

**Keywords** cognitive radio; cognitive network; architecture; resource management; cross-layer design

## 1 引 言

当前网络无所不在, 各种网络类型层出不穷且网络应用不断深入, 用户对网络的可用性、可靠性和异构性要求与日俱增, 而当前部署的通信网络, 无论是遍及全球的电话网和因特网, 还是在特定场合应用的短波通信系统和集群通信系统, 大都依赖预设的网络基础设施, 可靠性不高且缺乏认知能力和自适应性<sup>[1]</sup>。这些网络内部缺乏及时有效的监测和响应机制, 网络单元无法动态有效利用网络资源并做出合理、正确的调整, 同时网络元素之间缺乏积极主动的协调联动,

只能根据各自了解的信息对网络事件做出孤立被动反应, 不能优化网络整体性能。为了在复杂多变的异构网络环境中最大限度地利用网络资源, 保证多样化通信业务及时、可靠的开展, 迫切需要对现有通信网络进行适应性升级改造, 允许网络单元主动监视网络状态、及时交互信息并依据系统目标采取适当的行动。具有认知能力的网络 (简称认知网络) 正是面对这种需求在认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 的基础上提出的一种崭新的智能型网络, 旨在利用伺机动态利用闲置无线频谱的思想来提升网络的资源利用率, 并通过赋予网络认知能力来提高通信系统在各种环境下的智能性、可靠性和适用性。本文从认知无线电的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61072043)。

作者简介: 王海涛, 博士, 副教授, 研究方向为无线自组网、应急通信和网络信息管理; 张祯松, 硕士, 讲师, 研究方向为网络安全和信息管理; 宋丽华, 博士, 副教授, 研究方向为网络网络测量和性能优化。

提出背景和技术特点出发, 阐述认知网络 (Cognitive Network, CN) 的需求特征、体系结构、资源管理方式和当前的研究工作。

## 2 认知无线电技术背景与特点

随着无线用户数量和无线应用规模的爆炸式增长, 无线频谱资源日益紧张, 已成为制约无线通信发展的瓶颈。与此同时, 为一些无线通信业务 (如电视广播业务) 预分配的授权频谱资源却存在不同很大程度的闲置。事实上就目前而言, 频谱利用率低下是比频谱稀缺更严重的问题。因此, 需要一种允许非授权用户适度利用授权频段资源以提高频谱利用率并进而缓解频谱资源匮乏问题的机制, 这正是提出和发展认知无线电技术的初衷。

为了解决无线网络中频谱日益紧张与频谱利用率低下这一矛盾, Joseph Mitola博士于1999年在软件无线电 (Software Defined Radio, SDR) 的基础上首次提出了认知无线电这一新型的智能无线通信技术<sup>[2]</sup>。认知无线电技术旨在变革传统的固定分配频谱资源的方式, 从频谱再利用的思想出发, 允许认知无线电设备伺机 (Opportunistic) 动态利用在空域、频域、时域和码域上出现的空闲频谱资源 (称为频谱空洞), 从而提高现有频谱资源的利用率, 进而较好解决频谱资源短缺和频率利用低下这一矛盾。其实, 动态或伺机共享无线频谱资源并不是新近提出的思想, 早在20世纪30年代海事通信系统就允许动态共享无线资源<sup>[3]</sup>。到20世纪60年代, 联邦通信委员会 (FCC) 允许在陆地移动通信系统中共享无线信道和民用频段。80年代提出的SDR和90年代提出的CR正是对这种思想的继承和发展, 允许更灵活高效地使用宝贵的无线频谱资源。

认知无线电以频谱感知、智能学习、动态频谱接入和自适应调节为显著特征, 通过感知-分析-学习-决策-行动这一认知循环过程来对外界的变化做出适时反应, 如图1所示<sup>[4]</sup>。图1中, 外部环境提供激励, 认知无线电对这些激励进行处理和分析, 从而提取有益于实现特点系统目标的相关信息。比如, 它可以通过分析GPS提供的位置信息决定通信环境是在室内还是室外。基于分析得到信息, 认知无线电按照当前策略库中的规则进行学习和推理, 并依据端到端目标做出通信资源规划和分配的合理决策, 然后付诸行动, 进行系统参数配置或调整以优化系统目标, 并将本轮

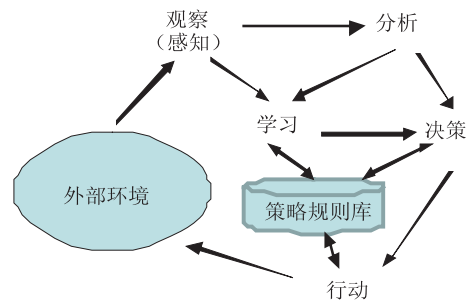


图1 认知无线电的认知循环过程

的决策和行动更新到策略规则库中供今后使用。本轮的行动会对外部环境造成影响, 然后系统重新开始下一轮认知循环过程。

认知无线电通过分析电磁环境寻找满足通信要求的频段, 如果找到可用的空闲频段, 则向网络发送资源分配请求并临时占用该频段。在认知无线电技术中, 称频段的授权用户为主用户 (PU), 而非授权的认知无线电用户为次用户 (SU)。SU只能利用PU当前未使用的频段, 一旦发现PU要使用该频段, SU必须在规定的时间内切换到其他未用的频段上。这样做既可以避免干扰主用户, 也不会中断认知无线电的通信过程。但是, 认知无线电也要避免过于频繁切换频段, 因为这会导致SU的服务质量急剧下降, 也降低了频谱的利用率。需要说明的是, 在某些情况下也允许SU在PU活跃的情况下共享使用PU的频段, 前提是SU的通信干扰不能超出PU正常工作设定的干扰门限。

## 3 认知网络的概念和内涵

认知网络有时也称自知网络 (self-aware network), 是在认知无线电的基础上提出的一种具有认知能力的新型智能型通信网络。不同于传统的典型领域的智能网络, CN具有自配置、自调节和自学习能力, 它能够实时感知网络条件, 并根据收集的当前网络外部环境、内部状态及经验信息基于系统目标需求来动态规划、调整和决策采取的行动, 以满足网络日益增加的复杂性、异构性和可靠性要求。也就是说, 认知网络能够从认知过程中积累经验并用于今后的决策和行动, 并且所有决策和行动服务于特定的系统目标。系统目标随网络情景的变化而不同, 如提高资源使用效率、改善业务的服务质量及增强网络安全性等。

目前, 有关认知网络的定义并没有统一的标准, Virginia Tech公司的Thomas给认知网络下的定义

为：它是一种能够感知当前网络条件并据此进行规划、调整和采取适当行动的网络<sup>[5]</sup>。IEEE 900.1工作组给出的认知无线电网络的定义是：能够在认知无线电设备之间建立连接并能根据网络环境、拓扑结构、操作条件和用户需求的变化调整其连接特性、操作行为的网络<sup>[6]</sup>。显而易见，认知无线电是认知网络在无线通信环境中的一种特例，它更多考虑的是无线设备如何根据网络环境调节工作频率和传输功率以高效利用宝贵的无线频谱资源。与认知无线电相比，认知网络更重视各网络组成要素的协调联动和重构以实现系统的总体目标。也就是说认知网络的认知行动涉及所有网络元素，包括全网范围内参与行动的子网、路由器、交换机、终端、编码和加密设备、传输媒介和网络接口等，而不是局部范围或个别元素。认知网络与认知无线电的另一个重要区别就是它能够很好地支持有线网络、无线网络和异构通信网络，而认知无线电仅能应用于无线网络<sup>[7]</sup>。与非认知网络相比，认知网络可以提供更好的端到端性能，显著改善资源利用率、业务服务质量、健壮性及安全性等。认知网络由多个节点组成并适用于异构网络这一特点为其认知处理操作增加了一个自由度。认知网络的能效和应用受限于所属网络单元的认知能力和适应能力以及能够接受的成本代价，这些成本代价包括网络的投资成本、规划成本、控制开销和运行耗费等。一般来说，认知网络的复杂程度高于非认知网络，但是基于认知行动获得的网络收益（如性能改善）要远大于额外的网络复杂度和开销增加所付出的代价，这也是衡量是否有必要构建认知网络的一个基本原则。举例来说，对于网络行为可预测的固定有线网络，没有必要在重新改造为认知网络；而动态变化的异构无线网络则很适合构建认知网络。

#### 4 认知网络的相关研究工作

目前，学术界和产业界均对认知网络给予了足够重视并开展了广泛研究，但现有的有关认知网络的研究大都针对常规的有线和无线网络开展，少量研究考虑了复杂的异构网络环境和实际应用需求。归纳而言，当前对于认知网络的研究工作主要包括以下几类：第一类是对认知网络的体系架构和网络模型进行研究，以便从系统整体上指导认知网络的设计和实现；第二类是在协议栈的特定层次应用认知无线电技术，如基于动态频谱分配技术在数据链路层根据信道

条件自适应调整节点使用的无线频谱；第三类是结合跨层设计方法，在多个协议层联合实施认知决策和行动，如节点根据底层反馈的数据链路和物理信道境的状态信息动态选择路由；第四类是从用户和应用角度出发对网络进行适当改造和动态配置以增强系统性能和改善用户的服务保障水平。

在认知网络的体系结构与网络模型方面展，Sutton等人提出一种基于节点可配置能力的网络平台框架<sup>[8]</sup>，但未考虑如何支持分布式推理、学习和集体决策，在此基础上Thomas提出了一个基于可配置网络的支持优化决策的认知网络框架<sup>[9]</sup>，但是该网络框架未体现认知网络中感知、学习、决策和行动之间的循环关系，并且没有考虑具体的应用需求和实际网络场景，实用性较差。张东梅等人提出了一种支持应急通信的认知网络模型，并给出了基于认知的服务质量控制和优化策略以及智能决策和学习算法<sup>[10]</sup>。该模型关注应急通信系统的建模、应急通信业务的定义与描述以及业务QoS保障等问题。此外，AAF(adaptive Ad Hoc free-band)项目针对认知无线网络中的物理层、数据链路层和网络层协议的设计内容提出了基本要求，设计了采用软件无线电和DSA技术的支持下一代应急网络xGEN的AAF协议栈<sup>[11]</sup>。欧美也在第6代框架项目中针对超3G通信技术提出了环境感知网络(Ambient Network, AN)模型<sup>[12]</sup>，旨在构造包含多种接入技术和多种网络类型的异构融合网络环境，根据通信设备的特征和网络环境条件为用户提供无所不在的尽可能好的服务。

在路由协议设计方面，赵超等人将认知无线电技术引入Ad hoc网络中，设计了支持多信道的认知Ad hoc协议<sup>[13]</sup>。认知Ad hoc网络的路由问题很复杂，针对网络可用频谱的时变性、多样性和差异性，提出了两类路由尺度：最大化平均吞吐量和信噪比。

在网络资源动态分配策略方面，胡晗等人基于认知无线电理论，在原有的主次用户的基础上，引入了另一类特殊的认知用户，提出了视认知用户的优先级介于主用户和次用户之间的具有三级优先级的动态频谱接入策略<sup>[14]</sup>。仿真结果表明，采用三级优先级策略的认知无线电通信系统可有效降低认知用户的阻塞率及强制终止概率。

此外，还有一些学者研究了认知无线电和认知网络在不同场合中的应用问题。文献<sup>[15]</sup>提出将认知无线电应用到应急通信场景中来提高应急通信服务的可靠性和可用性。例如，当出现大量突发性应急业

务时, 允许应急用户有条件地使用其他通信系统的空闲资源, 特别是稀缺的无线频谱资源, 并且通过适当的机制加强各通信系统之间的协同配合以优化全局目标。文献[16]将认知无线电技术应用到无线传感器网络中, 提出了一种多频多跳的无线传感器模型, 有效减少同信道干扰, 增强数据传输并发性。还有一些学者考虑了认知网络在军事通信系统的应用<sup>[5]</sup>, 如美军的下一代战斗网无线电台就是一种集成了智能天线技术的多频段、多模式的认知无线电台, 能够快速组网并具有很强的抗干扰性。今后, 认知网络还将在3G移动通信系统、情景意识服务和智能网络领域发挥巨大作用<sup>[17]</sup>。

## 5 一种通用的认知网络体系结构

参考借鉴上述网络框架和模型并针对其不足, 本节给出一种体现认知循环过程并考虑应用需求的认知网络体系结构 (Cognitive Network Supporting Emergency Communication, ECCN), 将系统目标/用户需求、认知处理和底层网络关联在一起, 如图2所示。ECCN体系结构包含四个层次, 从上向下依次是应用目标层、认知处理层、(软件)可调节网络层和异构网络基础设施层, 分别说明如下:

(1) 最上层是应用目标层, 系统任务目标由用户提出或由应用需求决定, 这些任务需求通过识别、调整和优化等方式来驱动整个网络系统的行为。

(2) 认知处理层是ECCN的核心决策层, 实时接收应急用户的服务请求并通过网络监视器和传感器获取底层网络状态信息, 然后通过认知处理引擎

(CPE) 对上下层信息进行分析推理做出行动决策, 指导下层各种可调节网络单元的操作。此外, 除了控制决策外, 认知处理层还将网络的服务水平等信息反馈给上层应用和用户。认知处理引擎通过特有的认知规范语言 (CSL), 将系统目标映射为下层认知过程可以理解的形式, 以指导可调节网络单元的具体操作行为, 可以采用类似扩展标识语言 (XML) 这样的语言。此外, 认知处理引擎具有很强的自适应性和可伸缩性, 能够适应网络单元的增删、应用需求和系统目标的变化, 并支持分布式和集中式操作模式。

(3) 可调节网络层叠加在底层基础网络设施之上, 主要包括可调节的网络单元、网络状态监视器和传感器, 可调节网络单元 (如认知无线电台) 是认知决策的执行单元, 基于认知决策指令信息对网络设备和系统采取实际可行的操作。这些可调节的网络单元拥有一组可操作的状态集合, 认知处理引擎需要根据网络当前状态为可调节单元指定适当的操作状态以便使其分工协作来实现系统总体目标, 将选定的满足系统目标的状态集合称为优化状态集。如果认知网络可获知整个网络的状态信息, 那么网络的认知判决将非常准确。但是对于复杂的大规模异构网络而言获得全部的系统状态信息是不现实的。软件可调节网络 (SAN) 需要提供认知处理层可理解和利用的网络接口, 这些接口类似于应用程序接口 (API) 或者接口描述语言 (IDL), 并且应该是灵活和可扩展的。

(4) 网络基础设施层包含事发现场的各种网络系统和通信设备, 是网络运作的基础平台。

最后, 认知网络还包提供可与外部认知/非认知网络互联互通的外部网络接口。

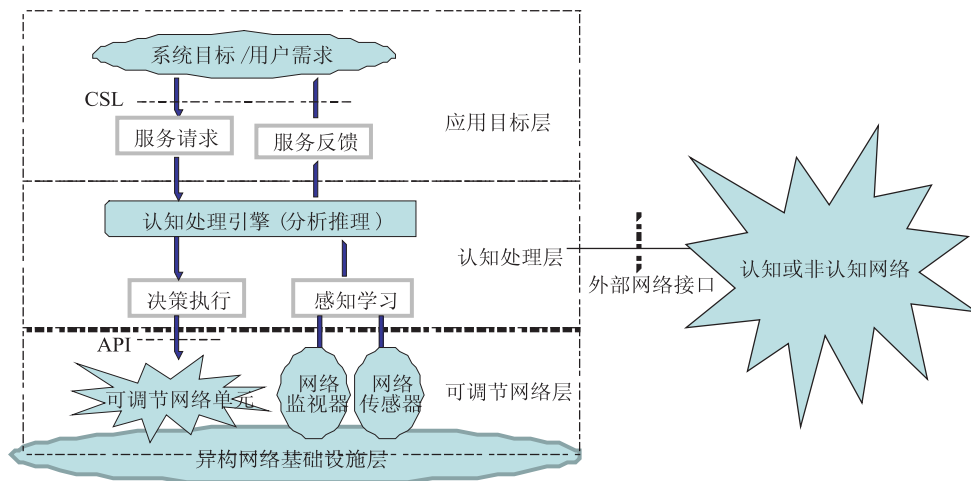


图2 一种通用的认知网络体系结构

不难看出, ECCN体系结构包括两个控制环: 一是应用目标层和认知处理层之间的反馈控制环, 用户向网络发出服务请求→认知处理引擎进行分析和推理→网络向用户反馈其服务能力→用户适当调整应用需求; 二是认知处理层与可调节网络层之间的认知控制环, 监控器和传感器向认知处理层传递网络状态信息和可调节网络单元的相关信息→认知处理引擎进行分析决策→认知处理层向可调节网络单元发出决策指令指导网络的具体操作。网络状态的变化有主动和被动之分, 被动变化是不可预测的, 如节点的移动、增删和无线信道环境的变化, 主动变化是通过有计划地调整和配置网络设备来影响网络状态向预期的状态变迁。网络状态信息包括本地信息(如BER、链路可用带宽和节点剩余电量等)和全局信息(如端到端时延和网络连通性等)。在ECCN网络体系结构中, 所有认知网络节点之间协同构成认知应急网络, 按照认知决策采取适当的操作以实现应用需求和系统目标。

## 6 认知网络的资源管理

网络资源管理能力是构建认知网络的必备能力之一。为了高效调动资源的使用, 认知资源管理模块(CRM)不仅需要了解资源使用情况、可用链路的质量和高层业务量信息(节点自身及其周围的情况), 还需要获悉网络拓扑和其他节点的信息。但是所有这些信息的收集是很困难的事情, 特别是在异构无线网络环境中。CRM通过全面监测和收集网络状态信息来判断当前网络的配置能否满足上层的应用需求, 然后按需动态分配网络资源并对相应的网络可调节单元进行重配置<sup>[18]</sup>。通过网络协议栈各层之间的信息交互和多个网络节点的协调联动来优化网络整体性能或实现特定系统目标。基于上述分析, 图3给出了一种认知网络的资源管理框架。该框架中包含网络信息收集和

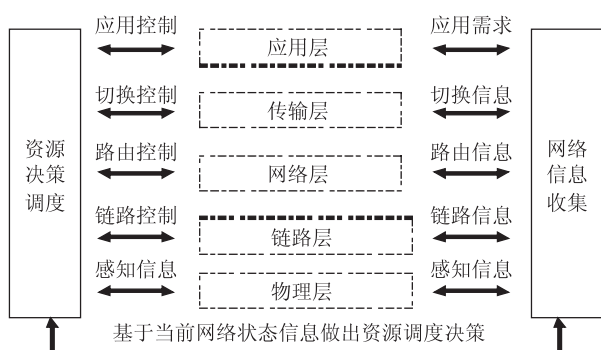


图3 认知网络的频谱管理框架

资源决策调度两大功能, 并且存在网络多层之间的交互, 因此有必要利用跨层设计方法, 即允许任意层次(而不仅限于相邻的层)双向交互必要的信息<sup>[19]</sup>。另外, 在资源紧张的认知无线网络中还可利用协作中继技术, 由频谱资源富足的节点充当中继节点来改善源和目的节点之间的通信性能<sup>[20]</sup>。

鉴于异构网络环境复杂多变并且各类业务有不同的QoS需求, 认知网络的频谱管理面临如下设计挑战<sup>[21]</sup>: 冲突避免, 各网络节点的资源调度应该避免与系统目标相冲突; QoS支持, 认知网络应该支持业务的QoS, 并要考虑动态和异构的网络环境; 无缝的通信, 认知网络应该提供无缝的通信, 即使在主网络激活的情况下; 动态资源分配问题, 如何选择适当的中继节点并为用户分配适当的资源。

## 7 结束语

当前, 信息通信系统尽管取得了长足进展, 能够提供包括有线、无线和卫星在内的多种通信技术手段, 但是仍不能很好适应通信环境复杂、业务种类多样且网络资源动态变化的异构网络环境。在认知无线电基础上提出并得到业界广泛关注和研究的认知网络是未来通信网络发展的一个重要方向, 认真网络能够高效利用网络资源、及时感知网络状态并能随网络环境的动态变化做出智能化调整, 非常适合在复杂多变的异构网络环境下为各类用户提供各自所需的通信服务, 具有广阔的应用前景和重要的社会及经济效益。但是必须清醒地看到, 认知网络是一个新兴的研究热点, 它的设计和实现更是一项复杂的系统工程, 涉及异构网络互连、情景感知、人工智能、信号处理和软件工程等多个领域, 需要解决一系列技术、政策和管理问题。

## 参考文献

- [1] 胡海波. 无线异构网络发展综述 [J]. 现代电信科技, 2009, 12: 19-23.
- [2] Jondral T. Software-defined radio-basic and evolution to cognitive radio [J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2005, 3: 275-283.
- [3] 侯赛因·阿尔斯兰. 认知无线电、软件定义无线电和自适应无线系统 [M]. 西安交通大学出版社, 2010.
- [4] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless

- communications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] Thomas R, DaSilva L. Cognitive networks [C] // *Proceedings of IEEE the Dynamic Spectrum Access Networks Standards Committee*, Maryland, USA, 2005: 352-60.
- [6] Venkatesha P, Przemyslaw P. Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 72-78.
- [7] 刘超, 王海涛. 网络发展的一种新动向——认知网络, *数据通信*, 2009(2): 1-5.
- [8] Sutton P, Doyle L E, Nolan K E, A Reconfigurable platform for cognitive networks [C] // *Proceedings of International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Mykonos Island, Greece, 2006: 231-238.
- [9] Thomas R, Friend D, DaSilva L A. Cognitive networks adaptation and learning to achieve end-to-end performance objective [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(12): 51-57.
- [10] 张东梅, 张世栋. 支持应急通信的认知网络QoS技术, *中兴通讯技术*, 2010(5): 33-36.
- [11] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. Next generation dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [12] Belqasmi F, Glitho R, Dssouli R. Ambient network composition [J]. *IEEE Network Magazine*, 2008, 22(4): 6-12.
- [13] 赵超, 徐少毅. 认知无线ad hoc网络中的路由尺度和算法设计, *电信科学*, 2011(3): 42-26.
- [14] 胡晗, 朱琦, 朱洪波. 应急通信系统的动态频谱接入及性能分析, *信号处理*, 2010, 26(6): 811-818.
- [15] Gorcin A, Arslan H. Public safety and emergency case communications: opportunities from the aspect of cognitive radio [C] // *The Dynamic Spectrum Access Networks Standards Committee 2008, 3rd IEEE Symposium on*. Chicago, USA, 2008: 1-10.
- [16] 陆佃杰, 黄晓霞. 认知无线电在无线传感器网络中的应用 [J], *先进技术研究通报*, 2009, 11(3): 18-22.
- [17] Pawelczak P, Prasad R V, Xia L, et al. Niemegeers, cognitive radio emergency networks – requirements and design [C] // *The Dynamic Spectrum Access Networks Standards Committee*, 2005: 601-606.
- [18] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 32-39.
- [19] 王海涛, 刘晓明. Ad hoc网络中跨层设计方法的研究 [J]. *电信科学*, 2005, 21(2): 22-26.
- [20] Zhang Q, Jia J C, Zhang J. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009: 111-117.
- [21] Ucek T, Arslan H. A Survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116-130.