



认知无线网络基础理论与关键技术研究^{*}

张 平^{1,2}, 李建武^{1,2}, 冯志勇^{1,3}, 张奇勋^{1,3}

(1. 北京邮电大学无线新技术研究所 北京 100876;

2. 北京邮电大学网络与交换国家级重点实验室 北京 100876;

3. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要: 认知无线网络是一种具有认知过程的网络, 通过网络环境的学习分析, 对网络状态进行规划、决策和响应。认知无线网络是解决网络容量受限问题的有效途径之一, 满足了国家对频谱高效利用和异构网络融合的战略需求, 作为 5G 关键技术为未来无线通信网络的发展指明方向。主要介绍认知无线网络的体系架构、研究的基础理论和实现的关键技术, 最后给出认知无线网络的验证演示平台。

关键词: 认知无线网络; 认知流; 资源流; 网络架构; 多域认知; 自主决策; 自主传输; 重构

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.02.001

Research on Basic Theory and Key Technology of Cognitive Radio Network

Zhang Ping^{1,2}, Li Jianwu^{1,3}, Feng Zhiyong^{1,3}, Zhang Qixun^{1,3}

(1. Wireless Technology Innovation Institute, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,

Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Cognitive radio network (CRN) is a cognitive process of network, which makes planning, decision and response for network state through learning and analysis of the network environment. CRN is one of the effective ways to solve the limited network capacity, and to satisfy the national strategic demand on the frequency spectrum efficient-utilization and the integration of heterogeneous networks. As the key technology of 5G, CRN indicates the direction for the future development of wireless communication network. The system architecture for cognitive radio networks, the basic theory research, the key technologies of implementation were introduced, and the demonstration platform of CRN was presented.

Key words: cognitive radio network, cognition flow, resource flow, network architecture, multi-domain cognition, autonomous decision, autonomous transmission, reconfiguration

1 引言

未来通信世界变化多端, 但其显著特点是高速增长

的, 宽带无线业务需求对无线网络提出了更高的要求, 无线网络演进正处于重大变革的契机点; 环境变化、需求差异、技术进步、业务增长、投资保护等因素造就了众多异构的无

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No. 2009CB320400)



线网络子系统并存的局面,给网络发展和建设带来极大困难,又无法满足用户日益增长的应用需求;同时无线网络中普遍存在资源静态管理、条块分割使用等问题,可用资源分布高度不均衡、资源短缺和浪费共存、使用方式不能根据需求和环境的变化动态调整等矛盾日益尖锐,造成了网络使用方式僵化、资源利用效率低下等问题。FCC 发布的最新数据显示,当前网络的频谱利用率仅为 30%。可以发现,当前无线网络的关键问题是:频谱利用率低、异构资源独立。这些问题已成为制约无线网络发展的主要瓶颈,而且日趋严重。这些现象的产生源于原有无线网络的设计思想:封闭式的静态网络工作模式,造成了网络融合需求与当前“孤岛”式异构网络的矛盾以及动态环境与静态网络工作模式间的矛盾^[1]。

为了解决这些问题,使网络从静态工作模式发展到动态自适应工作模式,从单一封闭式网络发展到异构融合网络,必须具备对无线环境、网络环境、用户环境等的高度认知能力;无线网络需在认知的基础上以一定的衡量准则进行自主的决策控制,并借助重构的手段达到适变的目的。可以看出,这些问题的解决离不开认知无线网络中的 3 个要素:认知、自主决策控制及重构。而目前封闭静态的无线网络体系结构不具备这些要素和适变性能力,因此认知无线网络所面临的核心问题是解决无线网络体系结构的适变性问题,在此基础上研究无线网络多域环境的认知性问题和认知无线网络管理与控制的自主性问题,以上问题就是从认知无线网络凝练出来的 3 个科学问题^[2]。

整个项目研究围绕 3 个科学问题展开,研究的内容包括:认知无线网络的理论、认知无线网络架构以及关键技

术。简单介绍了认知无线网络的验证演示平台,其研究的目的是实现频谱高效利用及异构网络融合,最终提升网络容量以满足通信业务发展的需求。

2 理论研究

认知无线网络中的理论研究主要包括:网络容量理论、认知流传输理论、资源流理论。

2.1 认知无线网络容量理论

容量研究在通信学科中有着重要的基础理论地位,对通信系统中的关键技术研究具有指导意义。通过认知无线网络的性能优化,网络的可达吞吐率可以获得提升。但是吞吐率还有多大的提升空间,需要通过网络容量来衡量。网络容量反映了认知无线网络的性能极限,指导着认知无线网络中关键技术研究,也是认识无线网络研究的最终目标。

2.1.1 传输容量界^[3]

定理 1 因果/非因果边信息下的认知多址接入信道传输容量域。

对于具有发射端独立因果边信息 S_{T_1}, S_{T_2} 和接收端边信息 S_R 的三开关信道,可直接对输入字符进行编码(即 $U_1=X_1, U_2=X_2$),其可达速率区为:

$$C_{(S_{T_1}, S_{T_2}) \neq f(S_R)}^{\text{因果, 非因果}} = \bigcup \left\{ (R_1, R_2): \begin{cases} R_1 \leq I(X_1; Y, S_R | X_2) \\ R_2 \leq I(X_2; Y, S_R | X_1) \\ R_1 + R_2 \leq I(X_1, X_2; Y, S_R) \end{cases} \right\} \quad (1)$$

其中, S_{T_1} 和 S_{T_2} 是发射端独立因果边信息, S_R 是接收端边信息, $\cup$ 指全部速率对撑起的凸包, 认知多接入信道容量增益的闭式外界和内界如图 1 所示。

首席科学家

张平

男,1959 年生,1990 年获得北京邮电大学博士学位,现任北京邮电大学网络与交换技术国家级重点实验室主任、教授、博士生导师。《科学通报》副主编,国家自然科学基金委员会信息学部第五届咨询委员、科技部国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,科技部国家高技术研究发展计划(“863”计划)主题专家、国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”总体专家。主要研究方向为无线通信新技术。获国家科学技术进步奖一等奖 1 次、国家技术发明奖二等奖 1 次、国家科学技术进步奖二等奖 4 次,获省部级科技奖励多次;代表大陆学者第一次获得 JCN 最佳论文奖;入选教育部“跨世纪优秀人才培养计划”并享受政府特殊津贴;获得“2010 年全国优秀科技工作者”称号;出版学术专著 7 本,发表多篇 SCI 检索论文,论文具有较高影响因子;获得发明专利授权 131 项,其中的关键技术已经形成了 7 项国际标准,已培养硕士、博士研究生百余名。

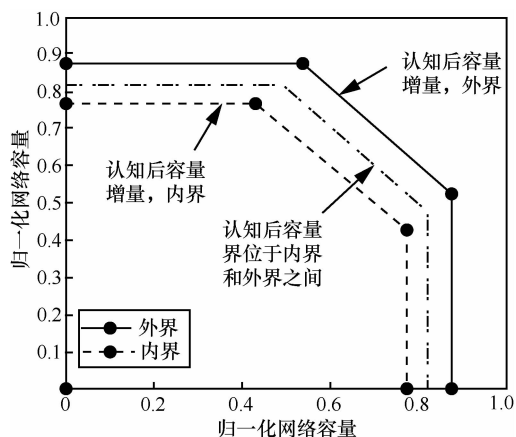


图1 认知无线网络传输容量界

2.1.2 网络容量的一般规律^[4]

网络容量的尺度定律揭示了认知无线网络容量的一般性规律。 $\Theta(n)$ 表示网络容量与网络节点数呈线性增长关系。

定理2 在双网共存情况下,主次网络容量均能达到相同的尺度定律:

$$\lambda(n)=\Theta(\sqrt{n/\log n}) \quad (2)$$

定理3 主次网络容量与时延之间的折中关系为:

$$D(n)=\Theta(n\lambda(n)) \quad (3)$$

定理4 通过协作,主网络容量能够达到:

$$\lambda(n)=\Theta(n/\log n) \quad (4)$$

定理5 通过节点移动,次网络容量能达到:

$$\begin{cases} \lambda(n)=\Theta(n) & (\text{i.i.d.移动模型}) \\ \lambda(n)=\Theta(n/S) & (\text{随机游走模型}) \end{cases} \quad (5)$$

通过以上容量理论研究,得到了认知多接入信道容量的外界和内界;证明了主次网络容量尺度定律互不影响、

认知能够倍增无线网络容量、协作和移动是提升认知无线网络容量的科学方法;揭示了主次网络共存下网络容量的普遍规律,为整个认知无线网络的研究提供了理论指导。

2.2 认知流传输理论

传统无线网络是基于预定义的协议规范完成控制信息和业务数据的传输与对等交互,这种对具有相同类型特征信息进行传输和处理的过程,构成了“控制流”和“业务流”。同样,在认知无线网络中,对认知信息的传输和处理过程也构成了其特有的“认知流”。通过进一步深入分析认知无线网络中认知信息的相关形态特征,提出了“认知流”核心概念^[5]:认知流是认知无线网络中认知信息产生、表征、度量、传递和应用的动态过程。通过认知流可以具体描述、刻画认知无线网络的认知信息工作特征。认知流的最终目标是实现认知无线网络容量的提升。

认知信息的产生表征:认知信息产生于多域的认知环境,通过多域、主动认知获取认知信息。然而,多域获取的认知信息具有复杂性、多变性,因此需要对认知信息进行合理的表征。在表征的过程中需要对无线环境域、网络环境域以及用户环境域进行粗细粒度的表征。

认知信息的度量:指通过数学分析度量认知流,得到认知频度、认知节点密度等参数对认知信息量的影响规律。

认知信息的传递:认知信息需要解决异构网络之间的认知信息传递,针对异构网络庞大、复杂,多节点认知信息接收的需求,需要设计合理有效的方式以适时地传递认知流,提升认知流传递的效率,为基于认知流的相关应用提供实时保障。

认知信息的应用:指以频谱效率提升和异构网络融合

项目简介

认知无线网络必须解决的重大科学问题包括:以适变性为特征的认知无线网络体系结构问题;无线网络多域认知基础理论与方法;以端到端效能为目标的认知无线网络自主管理与控制问题。

“973”计划“认知无线网络基础理论与关键技术研究”项目在深入研究无线网络中认知理论与方法的基础上,提出一种全新的认知无线网络体系结构模型,通过引入与用户平面、控制平面相分离的“认知平面”,更好地协调和支持网络内和网络间的学习、推理、预测、融合和决策等认知行为,并实现“认知流”与控制流和业务流之间的合理分离与有机协调。这种统一的认知无线网络架构能充分体现认知无线网络的适变性,对现有无线网络的演进和新一代无线网络的设计具有极其重要的意义。基于这一架构,以端到端效能为目标,本项目将探索行之有效的无线网络认知理论与方法;研究无线资源动态管理机制及异构无线网络重构能力;研究自主网络传输和适变机制;构建认知无线网络的理论模型、结构体系、方法和手段;为实现科学的认知无线网络奠定理论和方法基础。



为目标,以认知流为基础对认知无线网络进行传输机制设计、资源管理、性能优化和体系结构适变。

图2为基于认知流的异构网络模型。

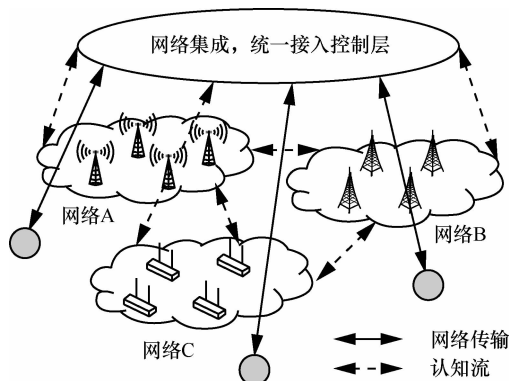


图2 基于认知流的异构网络模型

2.3 资源流理论

认知流在认知无线网络中起到前导指挥的作用,为实现容量提升目标,需要网络资源合理调动支撑。针对认知网络资源在共享利用过程中资源变化、迁移、汇聚等现象,提出资源流的概念并加以定位,以此阐述了认知网络系统对资源的管控过程。基于认知网络的资源空间模型,指明了资源流动过程的意义^[9]。

资源流定义为认知无线网络资源空间的资源矢量有序变化过程和行为。表现形式是业务的资源请求形成资源需求空间,它和资源状态空间之间的势差产生场强,驱动资源流动和自主配置,实现资源和需求的匹配。

资源流理论的主要内容:构建两级多维矢量空间模型,表征多维资源元素特征;运用数学矢量运算法则揭示

多维资源关联关系;形成面向管理的资源表征数据结构,建立认知网络资源表征体系。

图3为资源的场势变化示意。

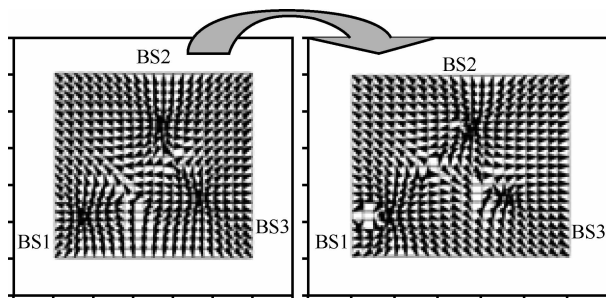


图3 资源的场势变化示意

面向异构网络中多域环境感知、资源管理和控制的自主性要求,以资源流概念表征认知网络的多维资源,形成统一的资源流框架指导和解决多种资源管理与分配技术中的关键问题,为大规模复杂网络的环境适变性提供解决方案。提出统一的资源流框架理论,指导和解决认知融合网络中多种多维资源联合管理和分配中的关键问题。

- 面向多域环境适配的多种资源管控的自主性和动态性,凝练资源流的概念表征认知融合网络多域多种资源。探索资源流的定义(具有相同属性的资源的逻辑方向流),将多用户对资源的请求规划为资源场空间强度的变化,实现自主资源配置。
- 定义端到端认知无线网络多域环境资源特征参量,包括资源归属、资源状态、资源属性,提出一种认知无线网络中资源流的构建方法及系统。
- 基于物理学中的统一场论提出统一的资源流框架

项目简介

“973”计划“认知无线网络基础理论与关键技术研究”项目的研究路线是以多平面的、具有适变特性的网络体系结构为依托,以具有预测推理能力的多域认知理论与方法研究为切入点,以自主资源管理、适变的无线传输和端到端重构为手段,建立一套完整的认知无线网络原理、工作机制以及体系结构标准。

“973”计划“认知无线网络基础理论与关键技术研究”项目充分体现了多学科交叉的优势,将构建认知无线网络体系结构,并建立无线网络认知理论和方法体系,实现认知无线网络端到端效能的优化提升,为新一代无线网络的设计奠定基础。研究结果将为国家中长期规划中关于信息和通信技术发展的重大需求和国防建设提供理论支撑,形成一系列具有自主知识产权的新一代无线网络领域国家、国际标准,对我国乃至全球在此领域的发展有重大推动作用。

理论,指导和解决多种资源联合分配中的关键问题。为认知融合网络的环境适变性提供资源协作和资源替代等新方案,实现多域多种资源联合管控,满足最优端到端的自主资源配置。

在认知融合网络中,资源有多种,资源流是对这些资源在无线通信中的经常性(归属)移动、(状态)转移和(属性)转化的动态过程的形象刻画。它是对资源动态分配和利用过程的高度抽象和概括。从构成上看,资源流的方向可定义为在控制流的调配下,服务于同一信息流(业务流)的多维资源的逻辑方向流。通过资源流可以清楚地描述汇聚的资源在不同资源池之间的有效流动。

3 认知无线网络架构

认知无线网络的理论研究需要协议架构的支撑,为

此,提出了适变的认知无线网络架构^[7]。主要研究内容为理论模型、功能架构、部署架构。

3.1 理论模型

异构网间通过认知流引导资源流合理流动以提高资源利用效率,设计的认知网络架构的理论模型如图 4 所示。

该架构的理论模型主要包括以下几个模块。

- 端到端效能模型:整个认知无线网络架构理论模型的驱动因素,基于端到端效能的目标,认知无线网络将进行相关认知信息的收集,由认知信息建立环境的映射,形成计划,优化决策,进而执行重构。
- 认知信息滤波器:主要用于设置滤波器,从多域环境中获取认知信息。
- 认知信息模型:建立认知信息的相关模型,用于进一步建立对多域环境的精确映射。

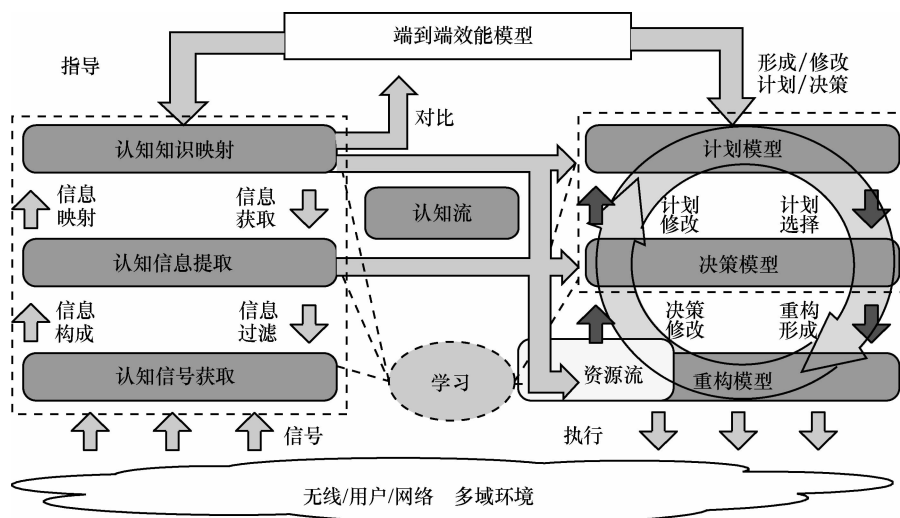


图 4 认知网络架构理论模型

学术团队

“973”计划“认知无线网络基础理论与关键技术研究”项目由北京邮电大学牵头,主要承担单位有:北京邮电大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中国人民解放军理工大学、中国人民解放军总参谋部第 61 研究所、浙江大学、武汉大学、哈尔滨工业大学。

在首席科学家、项目组专家以及责任专家的指导下,项目组成立管理办公室,并设立专门的人员对项目进行组织和监管。团队机构由首席科学家、专家委员会、管理工办公室组成,本项目包含 7 个子课题和 1 个特别工作组。

课题一:认知无线网络行为分析与网络效能研究。承担单位为北京邮电大学、武汉大学,主要研究内容和目标为:认知流行为分析与建模;认知无线网络性能优化;认知无线网络性能评估;满足端到端效能的认知服务体系。



- 认知映射模型:从认知信息模型中抽取相关认知信息建立对多域环境的映射,可以进一步从中得到现有网络状态下的端到端效能,用于同网络期望的端到端效能进行对比。
- 计划模型:以端到端效能为目标,建立相关计划的模型,为决策提供指导。
- 决策模型:以计划为指导,建立相关的优化决策,为重构的执行提供指导。
- 重构模型:以优化决策为指导,建立相关的重构模型用于执行重构命令。

在该认知无线网络架构的理论模型中,整个架构由端到端效能驱动,通过架构中模块之间的反馈和模块之间的不断交互,进而实现学习的功能。认知信息主要从认知信息模型和认知映射模型流向端到端效能模型、计划模型、决策模型和重构模型,实现了认知信息的有序流动,即认知流,体现了认知信息在整个认知无线网络运行中的基础作用,是网络运行的驱动因素和优化决策的重要参考因素。

该认知网络架构的理论模型对比 OOPDAL 的优点如下。

- 以端到端效能为驱动目标。
- 认知网络的行为目标明确。
- 充分体现了认知流在架构中的支撑作用。
- 架构的理论模型中各个模块之间的关系明确。
- 架构理论模型工作的终止条件明确(即达到端到端效能)。

3.2 功能架构

认知无线网络的功能架构是认知无线网络架构的理论

模型在基于蜂窝网的认知无线网络中的应用。基于上述认知无线网络架构的理论模型,设计相应的认知无线网络的功能架构,功能架构需要实现以下的功能需求。

- 具有获取、处理、表征和传递多域认知信息的功能。
- 具有以端到端效能为目标的学习功能。
- 具有以端到端效能为目标,进行多域资源的自主优化管理的能力。
- 具有重构功能。

综上,设计了如图 5 所示的认知无线网络功能架构。

该认知无线网络功能架构主要包括网络侧和终端侧。

网络侧和终端侧都包括如下四大功能模块。

- 认知信息管理(CIM):主要用于认知信息的获取、处理、表征和传递的管理。
- 数据库 & 智能管理(DB&IM):主要用于学习及长期认知信息、知识的存储。
- 网络融合管理(NCM):主要用于以端到端效能为目标,进行多域资源的自主优化管理。
- 重构管理(RM):用于认知无线网络的重构决策及重构执行的管理。

上述的功能模块根据功能细分,包括如下不同的功能子模块。

认知信息管理模块由下列子模块组成。

- 认知信息获取(CIG):主要用于从多域环境中获取认知信息。
- 认知信息处理(CIP):将多域环境中获取的认知信息进行预处理,将信息处理后变成对网络有实际意义的信息。

学术团队

课题二:认知无线网络多域认知体系模型与方法研究。承担单位为解放军理工大学、哈尔滨工业大学。主要研究内容和目标为:多域认知体系模型;无线频谱认知理论与方法;多域本地认知理论与方法;多域协同认知理论与方法。

课题三:无线网络主动认知机理研究。承担单位为总参谋部第 61 研究所、解放军理工大学。主要研究内容和目标为:认知无线网络主动学习推理机理与方法;认知无线网络知识共享与重用技术;动态环境下的认知策略与优化决策研究。

课题四:智能的动态网络资源管理模型与控制机制研究。承担单位为西安电子科技大学、总参谋部第 61 研究所。主要研究内容和目标为:矢量资源空间的基本理论和构建方法;"资源移动性"控制理论和方法;动态资源管理的自适应决策模型和机制;网间资源联合管理理论与方法;智能资源矢量分配理论与方法。

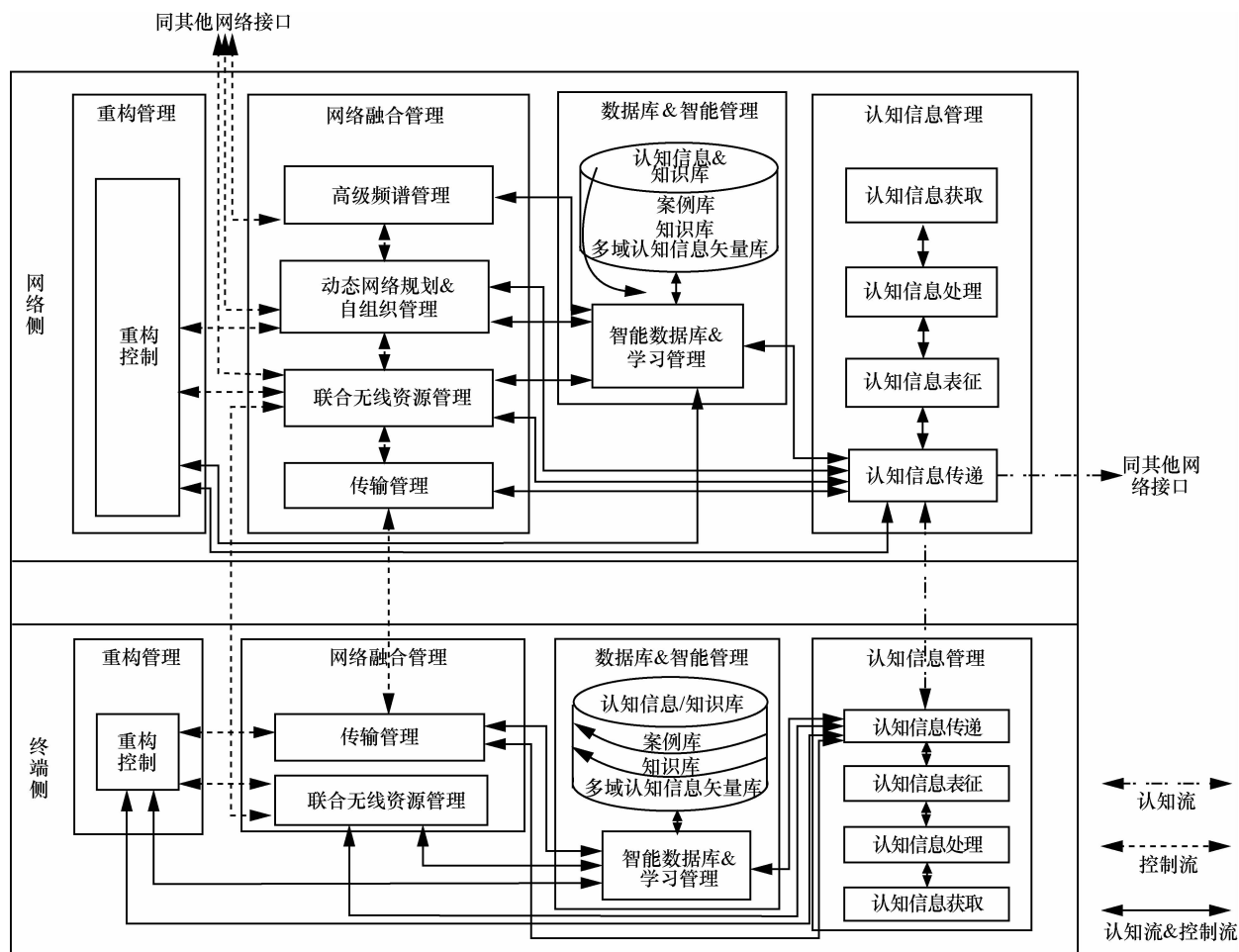


图 5 认知无线网络功能架构

- 认知信息表征(CIR):将预处理的认知信息进行表征,以客观反映多域环境的真实状态。
- 认知信息传递(CID):将表征的认知信息进行传递。

数据库 & 智能管理模块由下列子模块组成。

- 认知信息 & 知识库(CI&KDB):用于存储长期的认知信息和知识,用于更好地执行网络融合和重构的优化决策。

学术团队

课题五:基于认知的无线网络传输机制研究。承担单位为电子科技大学、浙江大学。主要研究内容和目标为:认知无线网络传输性能分析;基于认知的无线网络传输机制;认知无线网络传输自主控制与自适应机制;认知无线网络传输仿真测试平台开发。

课题六:认知无线网络系统体系架构研究。承担单位为北京邮电大学。主要研究内容和目标为:认知无线网络系统建模研究;认知无线网络体系结构设计;无线网络重构管理框架模型与构建方法;网络、业务、协议可重构性与重构机制。

课题七:认知无线网络验证演示平台建设与试验。承担单位为北京邮电大学。主要研究内容和目标为:建立自适应的、多平面的无线认知网络框架;验证多域信息认知的原理、机理和方法;验证与演示认知无线网络的关键技术和方法。



· 智能数据库 & 学习管理(IDB&LM):用于管理认知信息 & 知识库模块的操作和相关学习功能的实现。网络融合管理由下列子模块组成(根据网络侧和终端侧的不同,子功能模块略有不同)。

- 高级频谱管理(ASM):用于网络管理长期的频谱使用策略。不同的认知无线网络之间可以通过该模块交互长期的频谱管理策略。
- 动态网络规划 & 自组织管理(OMP&SOM):用于进行网络的动态自主规划管理。
- 联合无线资源管理(JRRM):用于协调管理多个网络之间的无线资源。

重构管理由重构控制(RC)模块组成,用于进行网络或终端重构的控制。

各功能模块根据接口的类型可以划分为两大类,即认知信息接口和控制接口。有些接口同时具有传输认知信息和控制信息的功能。在认知流相关的接口中传输的控制信息的主要作用就是控制认知流的传输。

3.3 部署架构

为了整合理论及功能架构,实现认知无线网络的有效部署,提出了一种基于认知平面的认知无线网络分层部署架构,将各网络的控制信息中有关网络融合的全局和长期的控制信息剥离出来,与用于网络融合的认知信息结合起来,形成一个基于认知的控制平面的大区,解决了目前网络存在的两个问题:一网一控制将会导致部分网络的控制信道利用不充分;要异构融合,必须将各个网络的一部分控制信息抽取出来,用于统一调度。认知无线网络部署架构的特点如下。

- 异构网络资源分布与用户信息密度匹配。
- 提出基于带内带外的认知导频信道(CPC)技术,实现认知流的高效传递。
- 控制平面信令大区 and 小区相结合的两层覆盖,业务平面按需覆盖。

分层部署架构如图 6 所示。在该网络中,部署架构实现了认知信息与控制信息、业务信息的分离,将网络分成两层,大区主要管理网络中的认知信息以及网络长期和全局的少量控制信息,如终端建立连接、为用户业务选择承载网络、网间切换等,共同形成认知平面;小区包括多种不同类型的异构网络,各子网络负责管理其内部的各种控制信息以及用户的数据业务,通过这种部分控制信令大区覆盖的方式实现控制与业务在覆盖上的分离。本架构的核心是将认知信息与控制信息、业务信息相分离,由大区统一管理。

在认知信息度量理论指导下,设计“集中管理+分布控制”的两层信令控制体系,支持静态与动态相结合的适变体系结构;通过认知导频信道传递认知流,实现异构融合,有效减轻信令开销负担;分层异构的网络架构在保证网络覆盖的前提下,可使控制信道开销减少,能够有效地提升网络资源的利用效率,提升网络覆盖区域的容量。

4 关键技术研究

认知无线网络架构的具体实现需要机制技术的驱动支持,关键技术研究主要有:多域主动认知方法、自主资源决策管理、无线自主传输机制以及体系结构适变技术。

学术团队

特别工作组:专门负责项目执行期间理论研究、标准制定、术语统一等工作,形成与国际标准组织接轨的具有特色的专题管理工作组。具体分为构架工作组、术语工作组、标准工作组、容量工作组、平台工作组。

经过 5 年的研究,项目组实现了人才的培养,促进了我国信息网络领域的领军人才成长,形成了一支研究水平高、创新能力强的科研队伍。其中项目专家、课题负责人于全研究员在项目执行期间当选中国工程院院士;张平团队获国家自然科学基金委员会“创新研究群体”称号;张平、李建东团队获得“长江学者和创新团队发展计划”称号;李建东教授获聘长江学者特聘教授,并获得“教育系统先进工作者”称号;张平教授获得“全国优秀科技工作者”称号;周怀北教授获得“新世纪千万人才工程”国家级人选;项目组成员陶小峰教授获国家杰出青年科学基金资助;项目组成员张建华教授获得国家优秀青年科学基金资助;项目组成员张朝阳教授、冯志勇教授、张建华教授获得教育部“新世纪优秀人才”称号。

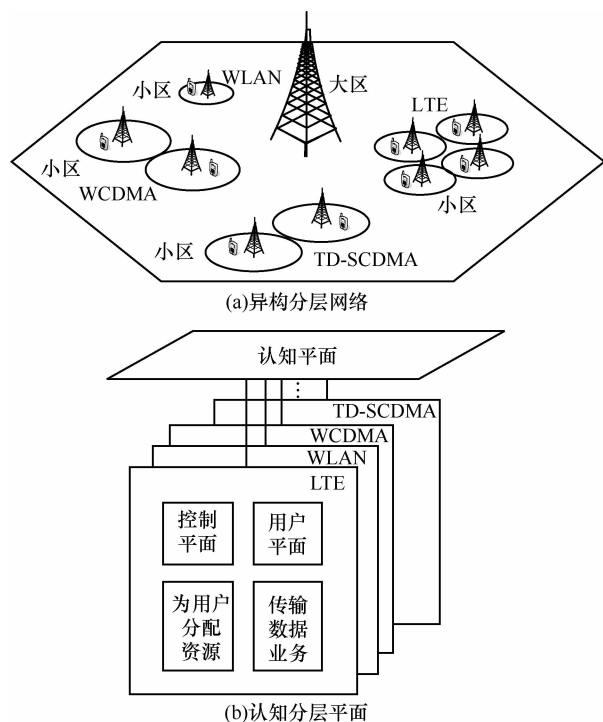


图6 基于认知平面的分层部署架构

4.1 多域主动认知方法^[8]

认知无线网络的首要问题就是认知网络环境信息。多域认知将认知的研究对象从无线域横向拓展到网络域、用户域与政策域,反映了认知对象的多域特性。认知内容不仅包括无线域的频谱空穴探测、主用户位置估计等,还拓展至网络传输时延与承载能力、用户的偏好与需求等,可以看出这一拓展不仅反映了认知无线网络与认知无线电相区别的本质属性,还丰富了其研究范畴与内涵。

多域主动认知的研究内容如图7所示。构建多域认知模型,有数学模型、信息运动模型及评估模型;根据认知模型,分别对无线环境域、用户环境域、网络环境域建立表征

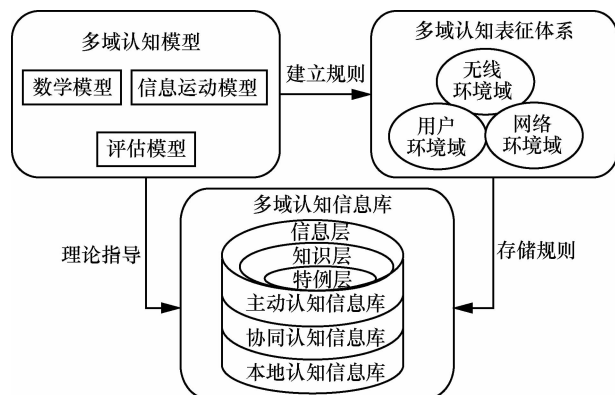


图7 多域主动认知体系模型

体系;在多域认知模型的理论指导和多域认知表征体系的存储规则下,建立多域认知信息库,包括主动认知信息库、协同认知数据库和本地认知数据库。

认知信息的获取是认知流产生的源头、引导资源流动的前提、提升网络容量的基础。全面认知无线域、网络域、用户域、政策域等多域环境信息,为无线网络调整、资源流动提供依据,为实现网络自主决策与体系结构适变提供支撑。

图7为多域主动认知体系模型。

4.2 自主资源决策管理^[9]

为实现多域认知信息的自主决策和有效管理,提出了基于资源移动性的管控过程,根据认知流信息,执行动态、自主、联合的资源管控操作,实现资源流动,达到资源状态空间与需求空间的匹配。在空间上分别对应:频域维度的基于博弈的频谱资源管理、空域维度的基于多天线的多域资源管理以及网络维度的认知异构网络多网资源配置。

基于博弈的资源管控:提出基于纳什议价解(NBS)及其改进解(KSBS)的分层博弈频谱共享方案,兼顾主次用户,进行多阶段频谱租赁和频谱定价协商,通过功率控制解决认知网络资源分配问题,最终达到频谱资源的流动共享。

基于多天线的联合资源管控:通过感知分析确定空闲特征模式,设计基于空分复用的联合自适应波束成形,实现基于空间相关度的多域资源联合管理与分配。设计基于空分复用的联合自适应波束成形、认知MIMO系统上/下行信号处理算法、基于空间相关度的授权频道与认知特征模式联合选择等多种空频资源联合管理方法。

基于认知的异构网络多网资源配置:建立异构多接入网络并发传输的能耗模型,分析基于能量效率的最佳分流门限,提出最优的绿色分流策略,能够有效提升异构网络的频谱资源利用率和端到端吞吐率。

细化其功能模块,分析异构网络场景下资源联合使用的需求,实现资源的高效利用;提出终端和网络侧的动态资源管控效用双环结构,设计终端和网络侧的交互机制,实现终端侧和网络侧基于效用的资源管控;研究基于博弈的资源管控,基于多天线的联合资源管控以及基于认知的异构网络多网资源配置等资源管控技术,实现资源流动,达到资源空间与需求空间的匹配。

图8为基于资源移动性的资源自主管控。

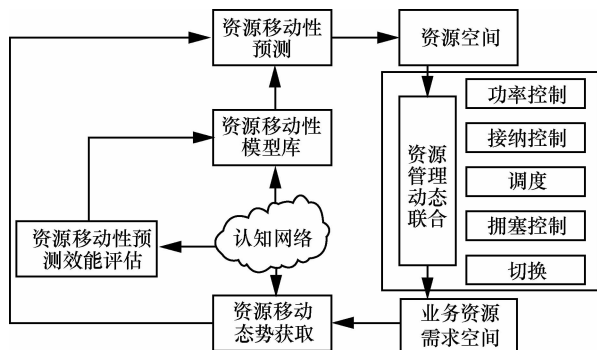


图8 基于资源移动性的资源自主管控

4.3 无线自主传输机制^[10]

无线自主传输机制针对多个异构网络共存场景,充分利用认知流提供的多域资源信息,实现网络传输容量和效能的优化,提高资源利用效率。传输机理如图9所示。

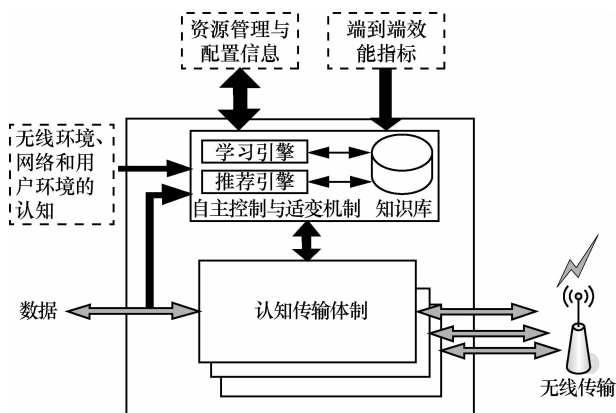


图9 传输机理

在异构网络复杂干扰的环境下,自主传输机制是网络扩容的关键方法。充分利用空间、时间和频率等多维资源,并针对物理层、MAC层和网络层等协议层次进行认知无线传输机制的设计。无线自主传输技术路线主要包括以下几点。

频率适变(f),匹配频域资源:基于频谱适变的思想,提出了基于OFDM-TDCS的频谱自适应认知无线网络自主信令传输机制。

时频适变(t, f),匹配时域与频域资源:充分利用无速率编码的链路自适应性和抗干扰、纠删能力,自主适配认知链路由于主用户活动性所引起的动态不确定性,提出了基于无速率编码的无线链路自适应认知数据传输和控制机制。

空、时、频适变(t, f, s):认知多天线技术,是实现未来高速率数据传输的基础。对认知无线网络中多天线、多用户信号处理的基本问题做了相应的研究,分别针对MISO和MIMO的场景提出了发射信号优化设计方法。

网络适变(n, p):认知MAC、路由、跨层设计等技术,是实现传输效能的基础。对频谱接入、信道分配、功率控制、中继控制等认知无线网络传输的自主控制和适变机制进行了深入研究。包括:认知多跳网络中稳定的联合路由和信道分配研究、认知多跳网络中考虑碰撞限制的路由和资源分配研究、认知协作中继传输的适变控制机制、考虑硬件能力限制的联合频谱感知和频谱接入机制、基于非合作博弈的分布式频谱共享接入技术、基于不完全网络信息的认知频谱接入和传输策略、多用户多信道认知无线网络的队列分析、认知无线电多用户信道接入和传输速率选择的策略学习机制、基于“反压”控制的适变传输控制机制、基于节点移动的认知跨层适变传输控制机制。

4.4 体系结构适变技术^[11]

认知无线网络的根本目标是提高网络容量,而真正实现对网络容量的提升必须通过改变当前网络状态来实现,也就是根据收集到的环境信息进行分析整理,得出具体的决策,然后进行网络的结构适变,以最终实现对网络性能的优化和提升。为了实现认知网络的优越性,对体系结构适变技术进行深入研究,并针对复杂多变的重构层次和需求,给出高效稳定的实施机制,实现网络结构适变。

针对结构适变管理进行了框架层面的建模,从网络行为的本质规律出发,依据作用域对重构行为进行了尺度划分,并从跨层、Self-x、分流、会话型业务重构4个方面阐述了具体的构建理论,提出面向不同时间粒度的无线网络业务、协议、参数重构方法与机制,解决了无线网络快速自主重构难题。

由重构模型归纳出3个基本属性。

- **大尺度(业务重构)**。业务和网络拓扑重构是从网络及功能的角度,分拆数据,选择传输的网络拓扑,综合调度全网资源的最优分配。包括业务分流机制的引入和全网拓扑重构研究。
- **中尺度(协议重构)**。以协议整体作为基本单元,重构时根据环境变化进行成套的切换,根据传输拓朴使不同网间协议互通。协议重构的对象为协议组件,目标是提供更好的服务以满足QoS要求。
- **小尺度(参数重构)**。以具体系统参数作为决策对象,作用于特定网元。参数重构可归结为最优化问题进行求解,结果为一组能获得最大系统性能的参数值。按照这组参数值进行配置就可以实现对动态环境的适应,支持数据拆分传输和网络调整的各个环节。

体系结构适变性的研究,着重于对网络进行实质性变更以真正实现提高网络容量的最终目的。通过网络重构变更作用域为索引,按照小、中、大 3 个尺度,针对不同的重构对象和方法进行了深入研究,并给出了高效稳定的实施机制。图 10 为重构三层面模型示意。

5 平台验证

基于以上理论及技术研究成果,围绕频谱高效利用和异构网络融合的两个需求,紧跟下一代无线通信系统的发展趋势,设计并实现了基于 TD-LTE 的认知无线网络验证演示平台,对提出的关键理论技术进行实际验证,以支撑整个项目关键理论技术的完整性。

平台主要验证及实现功能:双频段认知无线网络验证、新型频谱检测技术及地理认知数据库的设计与实现、认知无线状态下的频带切换和带宽重构的设计与实现以及异构网络环境搭建及分流传输的设计与实现。

平台的创新如下。

- 国际上第一个联合考虑认知功能和面向异构网络组网的验证演示平台。
- 国际上首次考虑基于 TD-LTE+制式的 2.3~2.4 GHz 频段,添加认知功能的具有面向产业平滑演进特性的验证演示平台。
- 国际上率先针对 2.3~2.4 GHz 雷达主用户设计创新频谱检测机制的验证演示平台。

平台的技术指标远远高于美国 FCC 制定的标准,其技术指标见表 1。

表 1 平台技术指标

指标	美国 FCC 标准	平台指标
检测精度	-114 dBm	TV: -120 dBm; 雷达: -113 dBm
检测周期	无业务: 30 s; 有业务: 60 s	10 ms
检测速度	N/A	TV: 4 ms; 雷达: 3 ms
切换时间	2 s	50 ms

认知 TD-LTE 无线网络平台民用场景如图 11 所示。选用 2.3~2.4 GHz 和 698~806 MHz 频段,实现了在宽带移动通信网中的频谱动态高效利用和异构网络融合。

军事应用背景下的战术认知无线网络原型系统如图 12 所示,针对超短波、短波、卫星、微波接力和 WLAN 链路构成的异构战术网络验证认知网络关键技术,实现复杂战场环境条件下的动态资源调度和端到端 QoS 保障。

6 成果总结

本项目不仅立足于认知无线网络的基础理论与关键技术研究,还将多项研究成果推广到产业化应用中,在满足国家战略需求的同时也带来了社会经济效益。在国际上,项目组代表我国承担 WRC-11 1.19 议题研究,推动形成 RA-1258 号决议;提交国际标准提案 45 篇,形成 3 项国

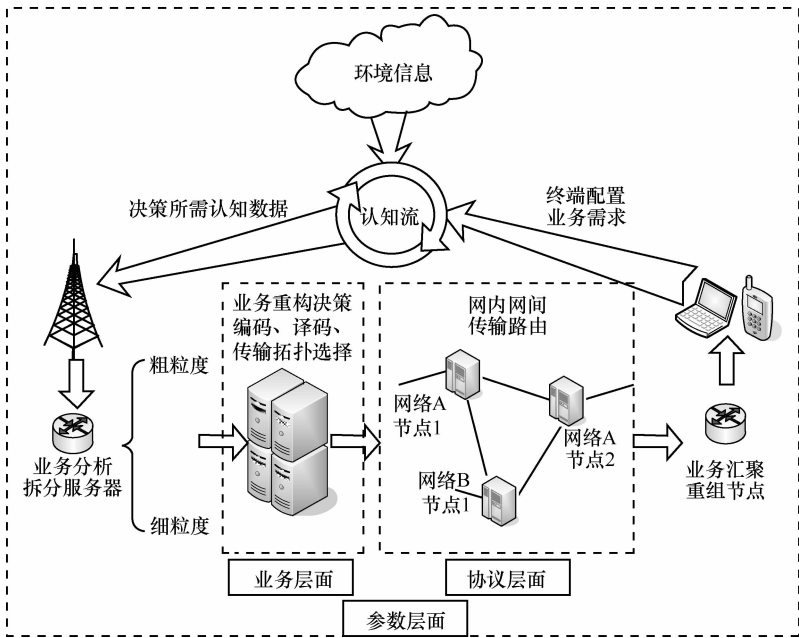


图 10 重构三层面模型示意

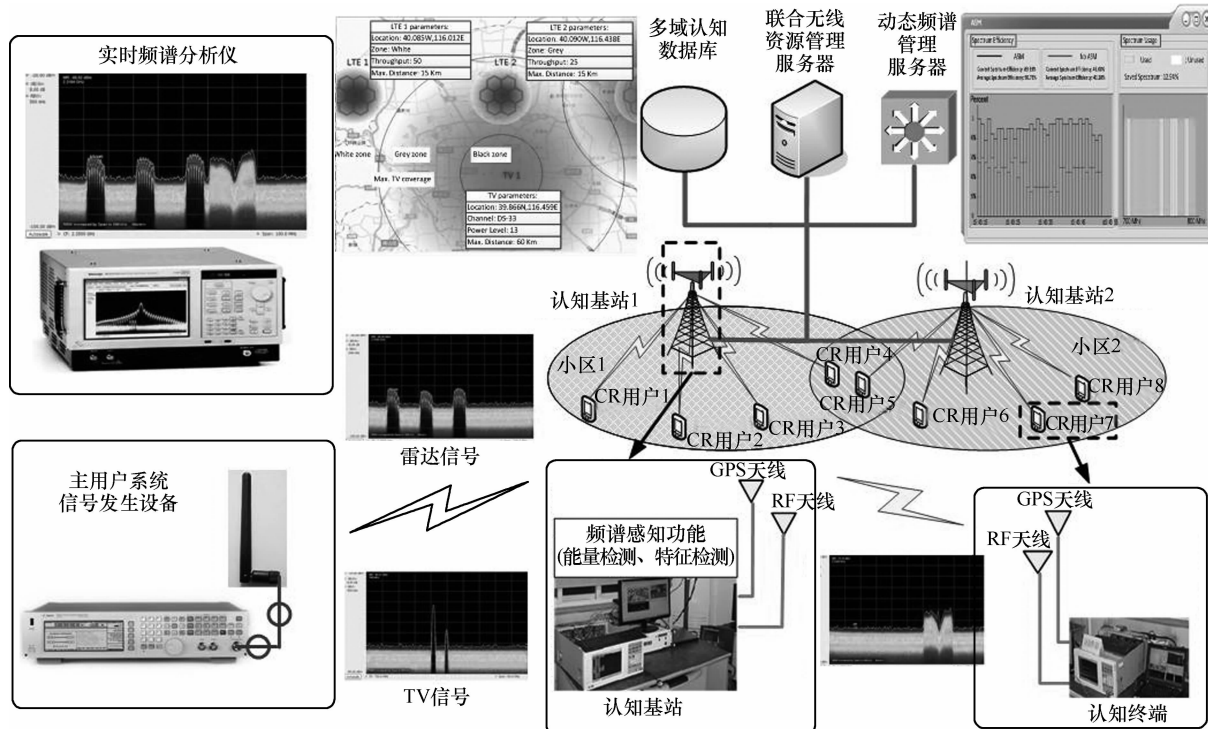


图 11 民用场景

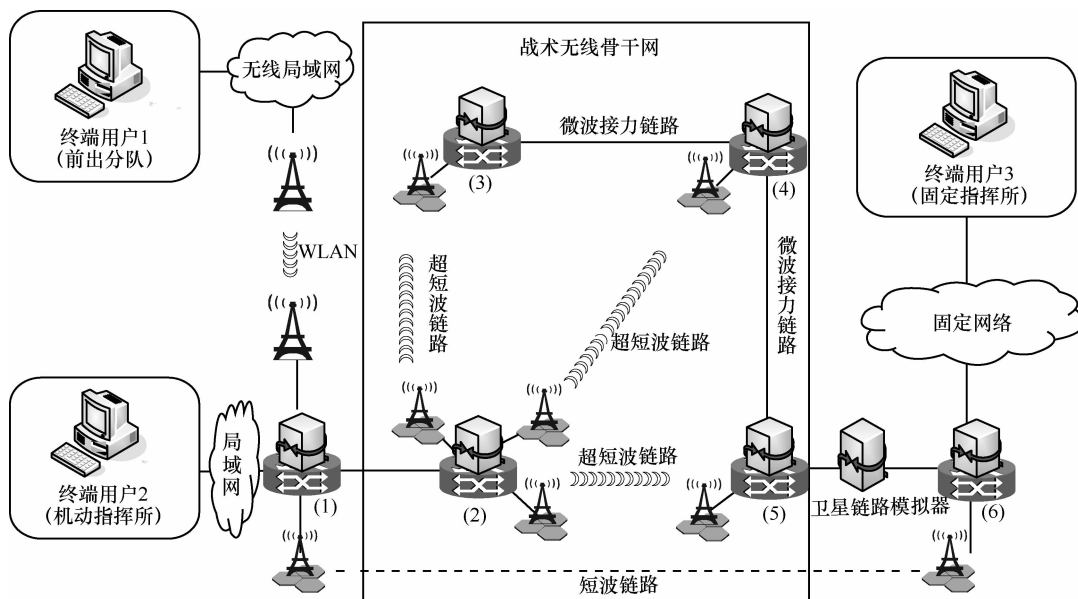


图 12 军用场景

际标准;基于认知的 IMT 系统关键技术被 ITU 采纳,形成 ITU-R M.2242 国际标准;认知无线网络架构等成果写进 ITU-R M.2225 标准;三区划分动态频谱接入机制等成果成为 IEEE DySPAN-SC P1900.6a 的部分核心内容。在国内,提出的广播电视和 TD-LTE 系统共存技术方案,推动了我国 700 MHz 频谱高效利用,为我国政府相关决策提供技术依

据;提出的雷达与 TD-LTE 系统共存技术方案,推动了军民系统共存,为 TD-LTE 发展争取频谱资源奠定了技术基础;提出的北斗与 TD-LTE 系统邻频共存技术方案,为我国空间战略实施和宽带移动通信产业发展双赢做了技术支撑。此外,项目研究成果还支撑了国家高技术研究发展计划(“863”计划)“5G 无线网络构架与关键技术研发”的立项

工作;推动了国家科技重大专项“宽带无线移动通信频谱军地共用研究”立项工作。在民用领域的应用中,提出的控制与业务分离的两层网络架构核心技术应用于中兴通讯 Super Cell 产品中;提出的无线网络重构核心技术成果已获得多项授权发明专利,并应用于华为技术有限公司 SingleRAN 多模基站系列产品,该产品已用于中国移动 TD-LTE 大规模试验网建设中;提出的认知异构网络多网资源配置方法,推动了陕西省智慧城市的建设。在军事领域应用中,项目提出的多项成果已应用于现有信息分发系统和短波网中。

7 结束语

本文从认知无线网络基础理论与关键技术研究的整体思路出发,明确了研究背景及意义,简要介绍了项目研究的基础理论,给出了认知无线网络容量界及其容量的一般性规律,理论研究证明通过认知流与资源流的配合可有效实现网络容量提升;为支撑理论研究提出了新型的认知无线网络架构,主要从理论模型、功能架构和部署架构展开研究;认知无线网络架构的实现离不开关键技术的驱动,包括多域主动认知方法、自主资源决策管理、无线自主传输机制和体系结构自适应技术等;结合基础理论及关键技术研究搭建了认知无线网络验证演示平台。最后,给出了项目成果在国际国内的地位和影响力以及面向实际应用的产业化推广发展。

参考文献

- 1 张平,冯志勇. 认知无线网络. 北京: 科学出版社, 2010
- 2 973 无线认知. <http://www.973cwn.cn>
- 3 Zhang Z Y, Luo H Y, Zhang J M, *et al.* Cognitive radio transmission strategies exploiting the primary-link adaptivity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011,60(8):3805~3813
- 4 Gao L, Zhang R, Yin C C, *et al.* Throughput and delay scaling in supportive two-tier networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(2)
- 5 Xu W, Lin J, Feng Z, *et al.* Cognition flow in cognitive radio networks. *China Communications*, 2013(10)
- 6 Yang C G, Li J D, Seng M, *et al.* Resource flow: autonomous cognitive resource management framework for future networks. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(28~29):3691~3697
- 7 Zhang P, Liu Y, Feng Z Y, *et al.* Intelligent and efficient development of wireless networks: a review of cognitive radio networks. *Chinese Science Bulletin*, 2012,57(28~29): 3662~3676
- 8 Ding G R, Wang J L, Wu Q H. Mult-domain cognition in

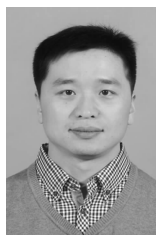
cognitive wireless networks. *Frequenz*, 2011(11~12)

- 9 Han W J, Li J D, Tian Z, *et al.* Dynamic sensing strategies for efficient spectrum utilization in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011,11 (10): 3644~3655
- 10 Hu S, Bi G A, Guan Y L, *et al.* Spectrally efficient transform domain communication system with quadrature cyclic code shift keying. *Communications, IET*, 2013(4)
- 11 Zhang P, He Q, Feng Z Y, *et al.* Reconfiguration decision making in cognitive wireless network. *Chinese Science Bulletin*, 2012,57(28~29) : 3713~3722

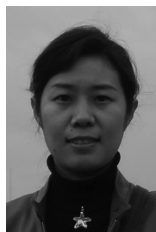
[作者简介]



张平,男,北京邮电大学教授、博士生导师,无线新技术研究所所长,北京邮电大学网络与交换国家级重点实验室主任,国家自然科学基金委员会信息学部第五届咨询委员,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)主题专家,国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”总体专家,主要研究方向为认知无线网络技术、3G/B3G/4G 关键技术、MIMO-OFDM 系统等。



李建武,男,北京邮电大学博士研究生,主要研究方向为认知无线网络关键技术与认知无线网络安全。



冯志勇,女,北京邮电大学教授、博士生导师,泛网无线通信教育部重点实验室主任,主要研究方向为认知无线网络频谱感知与动态频谱资源管理、异构网络融合及跨层设计、未来网络一体化等。



张奇勳,男,博士,北京邮电大学讲师,主要研究方向为认知无线网络关键技术、异构网络融合、认知导频信道技术等。

(收稿日期:2014-01-20)