

认知网络体系结构研究新进展

王慧强 徐俊波 冯光升 王振东 陈晓明

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘要 日益复杂的应用环境和多样化的用户需求,致使当前网络系统管理极度复杂,且缺乏智能的自适应能力。认知网络正是应这种实际需求而产生的,它被认为是提高网络整体性能及端到端性能、简化网络管理、解决网络自律性的新途径,是下一代网络发展的必然趋势。首先对认知网络体系结构的研究动态进行总结归纳,介绍了3种典型的认知网络体系结构,在此基础上提出了一个基于多级反馈 MDE 环的认知网络结构——超网络(Super-NET),并采用 PEPA 和 ODEs 相结合的方法进行了初步形式化分析,为构建认知网络理论模型奠定了基础,最后指出了认知网络研究所面临的问题与挑战,并对该领域发展方向进行了展望。

关键词 认知网络,超网络,自律计算,认知环,下一代网络

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Review of Architectures of Cognitive Network

WANG Hui-qiang XU Jun-bo FENG Guang-sheng WANG Zhen-dong CHEN Xiao-ming

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Increasingly complex application environments and diverse users' needs have resulted in the complicated management of network systems that is short of ability of intelligent self-adaptation. In response to actual demand, Cognitive Network(CN) was proposed, which is considered as the inevitable trend of the next generation networks. Since CN come into the people's vision, it has shown a great role in improving the overall performance of networks and end-to-end goals, as well as simplifying network management. Related work was summarized in depth in this paper firstly, and then 3 typical CN architectures were introduced briefly. Based upon the analysis of related work, a new more general framework called as Super-NET was proposed, which will lay the foundation for building theoretical model of CN. At last, problems and challenges facing by CN as well as direction of development were introduced briefly.

Keywords Cognitive networks, Super-NET, Autonomic computing, Cognitive cycle, Next generation networks

1 引言

网络系统的结构复杂性、环境复杂性、需求复杂性的急剧增长,导致网络系统管理愈加困难,网络元素(节点、协议、策略、行为等)缺乏智能的自适应能力,因此整体网络性能及端到端系统性能得不到保障^[1-3]。受限于层次化的网络结构,当前网络元素不能感知其它网络元素的各种行为及环境状态,网络系统的适应性问题得不到主动、全局的解决^[4]。而传统网络技术过多地依赖于人工干预,对复杂环境的适应能力明显不足,难以满足实际应用的需要。人们期望在网络层面上引入生物自律性质以解决上述问题,认知网络就是顺应这个需求而产生的新课题,并日益成为计算机网络领域和宽带通信领域研究的热点^[5,6]。

认知网络(Cognitive Networks, CN)是受认知无线电(Cognitive Radio, CR)理论和技术的启发而提出的,其核心思想

是网络系统能够感知内外环境变化,实时调整网络系统的配置,动态、智能地适应环境并指导未来的自主决策,也就是在网络层面引入生物自律性质,增强其环境适应能力和认知能力^[6,7]。认知网络的提出引起了学术界、商业界和军事界的广泛关注和深入研究,被认为是提高网络整体性能及端到端系统性能、简化网络管理、解决网络自律性的新途径,是下一代通信网络发展的必然趋势^[8]。作为计算机网络技术研发先驱的 DARPA 认为:一旦认知计算系统研究成功,将会在 10~20 年内迎来二次信息革命;而针对计算机系统的自律性问题,IBM 已经提出“自律计算”概念,旨在单机层面上引入自我管理、自配置、自优化、自恢复等生物自律机制以解决系统管理复杂性问题,这与认知的核心思想相吻合^[9,10]。自律计算思想在单机层面上取得的成功必将促进其从单机系统到认知的延伸,势必简化网络管理,增强网络认知能力,提高网络应对环境变化的能力。因此,学术界也有人将认知

到稿日期:2010-09-28 返修日期:2011-01-16 本文受国家自然科学基金重大研究计划(90718003),国家自然科学基金(60973027),黑龙江省自然科学基金(F201037),中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF100601)资助。

王慧强(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为认知网络、主动网络与信息安全、系统和软件可信性等;徐俊波(1971—),男,博士生,主要研究方向为认知网络, E-mail: xujunbo@hrbeu.edu.cn(通信作者);冯光升(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为认知网络和自律计算;王振东(1983—),男,博士生,主要研究方向为物联网技术;陈晓明(1983—),女,博士生,主要研究方向为可信计算与认知网络。

网络称之为“自律网络”(Autonomic Networks)。

维吉尼亚理工大学的 Thomas 对认知网络提出了较为准确的定义:认知网络具有感知当前内外环境变化和网络状态的能力,根据认知网络的整体目标及端到端目标,通过适当的学习机制,利用感知的环境信息和网络状态信息,实时动态地调整网络配置,智能地适应环境变化并能指导未来的自主决策^[7]。该定义区别于其它认知通信技术的关键要素是“网络整体目标”和“端到端目标”,如果没有此限制,该系统可被认为是认知无线电或者特定层的概念,而不是真正的认知网络。与非认知网络相比,认知网络可以通过改善资源管理、服务质量、接入控制等来提供更好的端到端性能。因此,认知网络并不仅限于无线网络,有线网络、Ad-hoc 网络等也是认知网络设计的对象^[11]。

本文从认知网络体系结构的角度出发,对学术界、商业界及军事界的典型性学术观点和代表性体系结构进行了较为系统的总结、归纳和分析,在此基础上提出了一个基于多级反馈 MDE 环的认知网络结构——超网络,并进行了初步形式化分析,为构建认知网络理论模型奠定基础;本文最后指出了认知网络研究所面临的问题与挑战,并就该领域的相关工作及发展方向进行了展望。

2 认知网络体系结构研究动态

按照认知网络体系结构研究的不同方面^[12-23],可将其划分为 3 层,如图 1 所示。顶层为应用层,包括应用程序、网络目标;第 2 层为认知过程层,研究内容侧重于形式化语言、认知层设计和网络状态感知等;第 3 层是 SAN 层(Software Adaptation Network),包括应用程序接口和可配置网络元素等。受应用层应用需求和网络目标驱动,认知过程层发出重配置的指令后,则会对该层的可配置元素进行配置,以满足端到端的目标。这 3 个研究层次与现实网络存在直接或间接的映射关系,认知层的提出将为整合现有的异构网络、消除网络层次间的信息壁垒以及实现网络系统的整体认知能力提供解决思路。

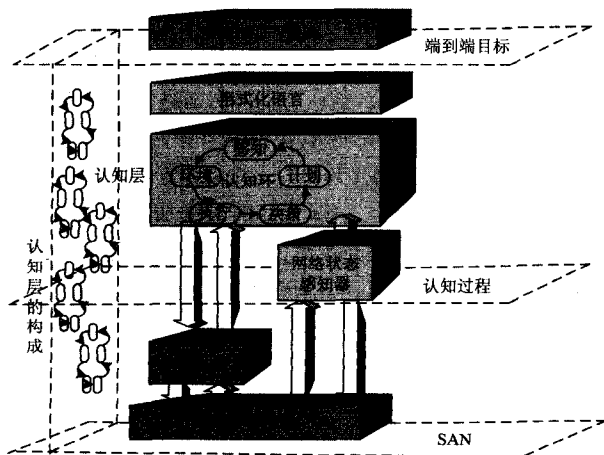


图 1 认知网络的研究层次

2.1 体系结构研究概述

认知网络遵循这样的认知过程:观察、规划、决策和执行,并且认为认知网络具有思考、学习和记忆的能力^[24]。如何设计这样的体系结构,学术界的观点不尽相同。在文献^[25]中,S. Shakkottai 等人提出了跨层设计“Cross-Layer Design”的观

点,打破了传统网络的层次结构,克服了网络层次间信息流通不畅的弊端,为设计具有认知能力的网络体系结构提供了一种解决方案^[26];MIT 计算机科学实验室的 David D. Clark 等人在跨层设计的基础上,以“Knowledge”为核心,首次将“内部状态感知”和“外部环境感知”等认知元素引入到体系结构的设计中,提出了一种新的体系结构 Knowledge Plane^[27,28]。Knowledge Plane 本质上是一种以当前 Internet 为基础、以人工智能作为核心、以构建抽象模型为目标的网络内部的普适系统;P. Balamuralidhar 等人^[14]认为上下文感知技术是使网络系统具备认知能力的关键技术之一,并将上下文感知方法引入到认知网络节点的设计中;Dzmitry Kliazo-vich 等人^[29]在前人研究的基础上提出一种认知网络综合模型,目标是支持 TCP/IP 协议栈一致性,简化重配置元素的管理,具备分布式认知能力和最低限度的网络支持,并使端到端的性能得到优化。以上方法均以“Knowledge”为核心,以推理为手段,通过引入认知元素使网络系统获得一定的认知能力。

商界对认知网络的研究源于现有企业网络不能满足日新月异的多样性业务需求^[30-34]。2003 年 HP 推出了“动态成长企业模型”战略,其核心是适应性 IT 架构。该架构通过优化 IT 资源,降低了基础设施的管理花销,提供了更多降低 TCO (Total Cost of Ownership)的方法,使企业能够快速应对挑战和机遇,增加了业务灵活度并提升了企业竞争力;2004 年 Intel 通信研究中心围绕网络服务自配置展开对自律网络服务综合框架进行研究,认为网络服务自配置是适应用户需求和环境变化、降低管理复杂度的技术基础,是实现自律网络服务的关键技术。Intel 通信研究中心采用 IBM 的标准接口和数据格式,识别出可自配置的网络元素,并逐步实现了自律网络服务综合框架^[35];Motorola 自律研究实验室于 2006 年也提出了一种目标驱动的认知网络架构:FOCALE,通过上下文感知和模糊指令识别技术,系统能够动态地、透明地适应用户的需求,推断用户意图,强化系统的交互能力。Motorola 目前已经初步实现了 FOCALE 原型系统,并积极从事 QoS 相关的研究^[36]。国内某著名公司正在开展全 IP 宽带移动网络架构及关键技术方面的研究和标准化工作,目的在于提高移动网络的认知能力,增强安全性,简化管理,有效降低运营成本,并能够动态适应用户需求。

认知网络作为下一代网络(Next Generation Networks, NGN)的研究重点,以其在军事、国防和国家基础设施上的重要地位引起了军方和政府的高度重视,其中由美国国防部高级研究计划署(DARPA)、欧盟等牵头开发或资助的项目尤为值得关注。2000 年,美国麻省理工大学的计算机科学实验室受 DARPA 资助开展 New Arch: Future Generation Internet Architecture(2000—2003)未来网络体系结构的研究,并提出了 FARA(Forwarding directive, Association, and Rendezvous Architecture),RBA(Role-Based Architecture)等体系结构框架^[37]。受美国国家自然科学基金、DARPA 和空军科学项目的支持,加利福尼亚大学网络研究中心于 2000 年开展了 Bio-Networking Architecture 项目的研究,根据生物系统原理提出了具有扩展性、适应性和生存性的自律系统架构^[38]。受 IBM 自律计算思想和主动网络研究的启发,DARPA 的 IPTO (Information Processing Technology Office)于 2002 年提出了认知系统,主要关注 IT 基础设施的认知能力。此系统架构的

目标是复制人类的认知过程,将其在计算层面上实现,且其架构能够基于历史统计信息进行学习,具有适应未来变化的能力。2004年 DARPA 的 IPTO 发起 ACIP (Architecture for Cognitive Information Processing)的研究计划,目标是开发下一代具有认知能力和动态演变能力的计算体系结构。该体系结构主要实现了在海量知识库和不确定等情况下的大规模问题的推理,在复杂动态环境下的资源规划与管理,以及先验知识的学习与演化等^[39]。

欧盟从第六框架计划开始,在 IST-FET (Information Societies Technology Future Emerging Technologies)计划中,对 ANA(Autonomic Network Architecture, 2006. 1—2009. 12), CASCADAS(Component-ware for Autonomic Situation-aware Communications and Dynamically Adaptable Services, 2006. 1—2008. 12), HAGGLE(2006. 1—2009. 12)等项目进行资助。ANA 的研究目标是利用当前 Internet 的网络技术开发一种新的计算机网络组织,最终目标是实现一个自律网络框架,使网络系统具有动态灵活和完全自治的能力^[40]。CASCADAS 开发了一套基于自律通信服务的通用组件模型体系结构,在该体系结构中主要由组件完成自律通信服务中的通信能力自组织、通信环境自适应和通信态势自感知,主要涉及的关键技术有态势感知、语义自组织和自相似等^[41]。欧盟在第七框架计划中继续对认知网络研究进行支持,例如 Self-NET(2008. 5. 1—2010. 10. 30)项目,其致力于将自我管理单元与反馈控制环相融合,从而为下一代网络提供自我管理的新方法等。

2.2 FOCALÉ 体系结构

面向信息集中管理的“烟囱”式系统框架已成为语音通信网络的事实设计标准,这就造成了管理复杂度急剧增加和信息交流不畅的弊端,迫切需要消除语音通信网络的信息交流壁垒,整合优化功能,实现通用数据的共享与重用。广大研究学者和制造厂商在追求功能丰富而操作简便的系统目标的同时,却造成网络服务实现过于复杂,因此急需引进智能的管理策略来改进现有状况。针对操作复杂性、系统复杂性和业务复杂性问题, Motorola 体系结构研究中心引入 IBM 的自律计算思想,提出一个以自律计算元素为基础的 FOCALÉ (Foundation, Observation, Comparison, Action and Learning Environment)认知网络体系结构(见图 2),也称作自律网络架构,目的是实现业务管理简单化,用户需求多样化和网络服务主动化。

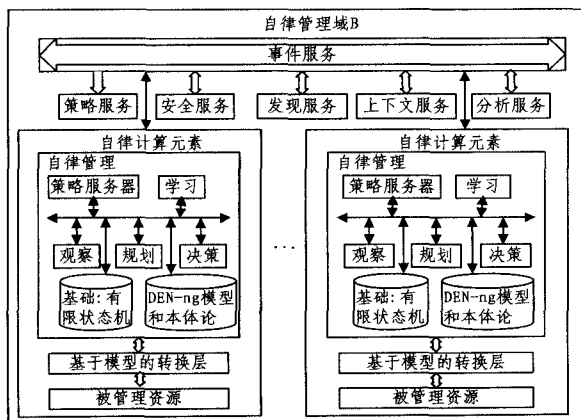


图 2 FOCALÉ 体系结构框图

自律计算元素 (Autonomic Computing Element, ACE) 是 FOCALÉ 框架的基础,此框架由 3 个基本部分构成:自律管理器 (Autonomic Manager, AM)、转换层 (Model-Based Translation Layer, MBTL) 和被管理资源 (Managed Resource, MR),如图 3 所示。其中 AM 既是 ACE 的核心,也是整个 FOCALÉ 的核心,任何 MR(例如简单的设备接口、复杂的系统整体或者网络等)均可被转化为一个自律组件。在 MR 和 AM 之间构建转换层 MBTL,其功能是将供应商规格传感数据转化为 AM 能够处理的形式。同样,MBTL 也能将 AM 定义的行为转化为供应商规格的命令。在每一个 ACE 中通过嵌入 AM,使 FOCALÉ 能够通过自感知组件 (Autonomically Aware Managed Component, AAMC) 和自启动组件 (Autonomically Enabled Managed Component, AEMC) 提供统一的管理功能。

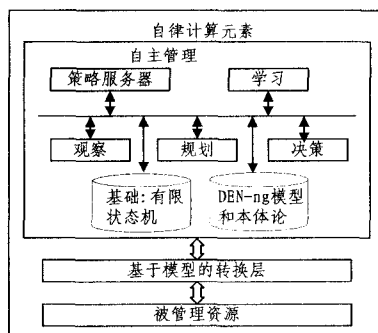


图 3 自律计算元素

AM 的主要内容有五元组 FOCALÉ = {Foundation, Observation, Comparison, Action, Learning Environment} 构成。FOCALÉ 采用 DEN-ng 信息/数据模型和本体方法构建其 AM 的 Foundation-有限状态机集合,集合元素代表系统的期望目的行为;Observation 作为认知过程不可缺少的一个组成部分,为 FOCALÉ 结构提供从 MR 获得的多种传感器数据;Comparison 用来比较被管理资源的当前状态和期望状态是否一致,并采用本体论方法对引起状态变化的根源进行推理,为决策和规划提供支持;Action 组件则根据状态的比较结果、Policy Server 的策略集合、Learning Environment 组件的学习方法及经验知识来规划系统相应的行为策略,以达到系统自适应于环境的目的;Learning Environment 则是从环境数据中获取知识,以指导 Action 的行为规划及将来的学习过程。

Motorola 正着手将 FOCALÉ 结构部署于复杂环境中,例如 3G(B3G)网络环境。当前网络环境下的管理系统的显著特点是技术相同而结构相异,在这样的环境下,支持端到端的服务质量保证对服务提供商将是一个重大的挑战。随组件数量的增多和业务范围的扩大,网络系统的管理复杂性将急剧增加,远远超出人工管理的极限。而 FOCALÉ 结构可以使用户在不同的接入网络(如 UMTS, Wifi, Wimax, xDSL 等)获得互联网多媒体子系统 (Internet Multimedia Subsystem, IMS) 的组合服务,简化终端用户的接入管理并满足个性化用户服务需求。

该体系结构与当前的网络系统架构相比具有明显的优点:①符合其设计规则的合法组件均可被 FOCALÉ 动态引入,并能与其它组件相兼容;②能够有效地管理 AEMCs,使之能够管理自身并与其它自律组件 ACs 进行通信;③能够有

效合理地组织 ACs 的行为并保证所有的 ACs 能够根据预置策略进行功能调整;④能够对环境进行推理,对基本的业务目标进行优化并保证其不会被违背和侵犯。但是该结构亦有明显的不足:①表示网络性能参数、环境参数的“知识”未给以足够的重视,致使其推理能力明显不足;②没有动态引入“知识”和校正“知识”的机制,欠缺对“知识”的分析能力;③该结构针对移动网络设计,不具有一般性和通用性。

2.3 ACF 体系结构

受 FOCAL 的启发,ACF 体系结构专家组提出了一种基于构件的、以模型为中心的、以控制网络行为为目的 ACF 自律网络体系结构,如图 4 所示。ACF 结构以自律属性为基本属性,目的是消除或减轻由累积错误导致的系统可靠性不高的问题。在 ACF 结构中,“知识”处于核心地位,网络性能参数、环境参数、业务目标及预置策略等信息均可形式化为知识,为 ACF 结构的推理和学习提供支持。由于应用环境、系统状态及业务目标等时常发生变化,ACF 结构需要引入新知识以应对所发生的变化,因此该系统结构是一种能够动态地校正旧知识、容纳新知识的自律网络结构。

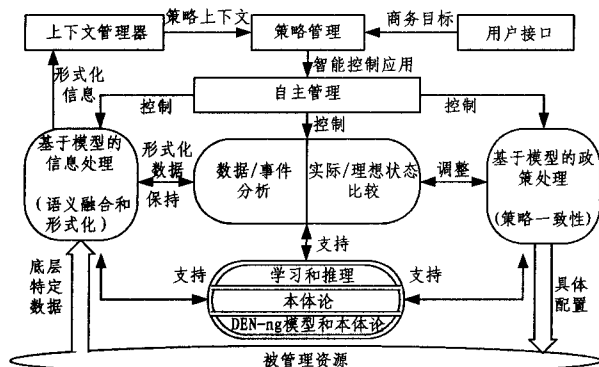


图 4 ACF 体系结构框图

与 FOCAL 明显不同,ACF 结构将信息模型和本体模型集成,使其能够对以手工配置为主要手段的网络管理系统提供重要的改进措施,能够支持上下文驱动的网络重配置方案,并最小化人为干预。同时,ACF 结构将“知识”嵌入到框架内部,以及时应对业务目标或者应用环境的变化。在此基础上,ACF 能够根据已有策略动态地产生新策略进行网络管理及自动配置网络元素,整个自配置过程与自律控制环保持基本一致。

ACF 结构采用一个或者多个本体模型对网络系统的静态结构和功能、动态行为和服务进行建模,而自律控制环则由这些本体模型构成。ACF 自律控制环与 FOCAL 相似,自律管理器 AM 是整个框架的控制中枢,系统行为均在 AM 的控制下进行。ACF 中基于模型的所有信息处理组件均依赖于被管理资源(路由器和其他网络设备)的信息模型和数据模型,在网络环境发生变化时,这些信息处理组件能够从被管理资源收集环境信息,持续地更新这些模型和本体,并对环境变化所造成的后果或潜在的影响进行分析。

相比 FOCAL,ACF 引入本体模型,将“知识”置于核心地位,着重解决了知识表示的问题,增强了系统的认知能力。但是该体系结构也存在明显的缺点:①ACF 功能是在较高的网络层次上实现的,如应用层等,而在网络基础设施中缺乏必

要的分散式自律管理,难以保证系统稳定性、适应性、可靠性和安全性等;②受到网络设备的可配置能力的限制,ACF 欠缺维护高度复杂和动态的网络拓扑的能力。

2.4 Self-NET 体系结构

目前的互联网模式是建立在网络协议层次化基础上的,缺少层次间智能交互机制,且当前大多数协议是针对普通用户和通用平台设计的,很少关注网络管理方面的任务。Self-NET 则是在面向系统和网络管理的分布式认知环(Distributed Cognitive Cycle for System & Network Management,DC-SNM)技术的基础上提出的一个新的基于层次反馈控制环结构的、以提高分布式系统的自我管理能力的自律网络体系结构,如图 5 所示。Self-NET 的网络元素高度自治,整体设计遵循自感知、自管理和自优化的原则并嵌入分布式、层次化的认知环,以便于分散管理、快速决策和局部优化等。Self-NET 认为未来互联网的认知范围覆盖绝大多数的网络元素,如路由器、基站、移动设备,甚至是网络管理员或者任何工作在服务层的软件元素等,而体现综合认知能力的认知环模型是其核心要素。据此,Self-NET 设计的分布式认知环(DC-SNM)不仅适应于网络管理,而且可以提升自律元素、网络域及服务域的管理水平和决策水平。

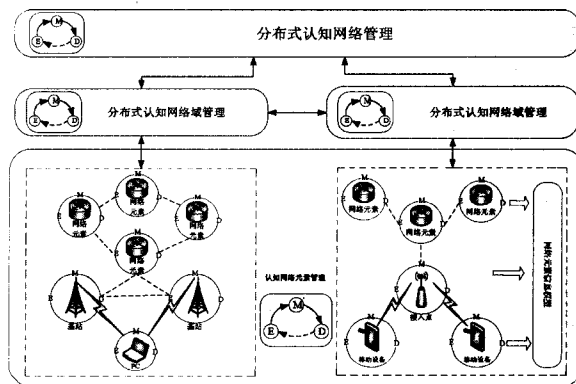


图 5 Self-NET 体系结构框图

相比其它的认知网络框架,Self-NET 的认知能力优势明显。但是,Self-NET 对“域”和“组织”的划分非常严格,虽然简化了网络管理,却给认知环中的“监控、决策、执行”方法带来了较大的复杂度,这无疑在提升了网络认知能力的同时将产生较大的时间开销和空间开销。

2.5 总结与比较

FOCAL、ACF 和 Self-NET 3 种体系结构基于不同背景提出,FOCAL 结构以商业应用为目的,ACF 结构是为了提高系统的可靠性,Self-NET 结构注重网络管理。因此,其结构设计各有侧重:FOCAL 侧重于提高网络的自律能力,实现网络的自主运行以减少人工干预;ACF 结构同样以自律为基本属性,但具备较强的感知及推理能力;Self-NET 结构面向系统和网络管理,通过部署的分布式认知环,实现从网络硬件元素到网络软件元素的认知。

为了描述上述 3 种认知网络体系结构的认知能力,从认知及实用化角度对 TCP/IP 协议的一致性、重配置能力、推理能力、网络支持度、目标、跨层设计 6 个属性进行归纳比较(如表 1 所列),其中:

TCP/IP 协议一致性(Consistency with TCP/IP):其属性

反映了新结构对标准 TCP/IP 协议的修改度。例如:TCP/IP 协议一致性越高,新结构的部署越容易。目前提出的认知网络体系结构中的多数不是“TCP-friendly”,这主要是由于其对协议栈重配置元素的依赖性。在上述 3 种体系结构中,Self-net 由于具备层次化的反馈认知环,可以从协议栈角度对其分层部署,实现“TCP-friendly”。

重配置能力(Ability of Reconfiguration):反映了认知网络结构对周围环境变化的应变能力,需要有重配置元素的支持,如:终端、基站、接入点、网关及网络协议等。重配置能力对增强网络体系结构的适应性,减少系统演化及调度维护的开销成本,实现新业务的快速引入有着重要意义。Self-NET 对未来互联网重配置元素有明确的定义并将认知环作为认知能力的核心要素,因此其重配置能力较高。

推理能力(Ability of Reasoning):是认知网络的核心能力。认知网络通过对网络元素及上下文环境的感知,根据预定的策略及先验知识进行推理判断而做出决策,以实现对网络行为变化的预测。认知网络推理能力强,其智能化水平高,所需人工干预少,使用成本低。ACF 结构由于引入本体模型,将知识置于核心地位,并着重解决了知识表示的问题,因此具有较强的推理能力。

网络支持度(Support Degree of Network):网络认知能力的发展趋势是在网络协议栈的某一个或几个层次上利用认知策略使不同的网络如 Mesh、Ad-hoc 等具备认知能力,从而避免对网络体系结构的大规模修改,实现认知网络的方便部署。相对而言,单层网络认知能力实现的网络支持度高于多层网络,且认知网络体系结构通用性越强,其网络支持度也越高。

跨层设计(Cross Layer Design):其目的在于打破原有协议栈层次化设计造成的层间信息交流不畅而导致的信息“短路”。通过对网络协议栈的跨层设计,实现网络协议层次间的信息交互,进而实现网络级的认知能力,是网络实现全局认知能力的必要条件。

目标(Goals):包括配置、数据流优化、效能度量、部署趋势等。

表 1 3 种体系结构相关比较

方法	TCP/IP 一致性	重配置能力	推理能力	网络支持度	目标	跨层设计
FOCALE	否	协议栈	弱	高	业务管理简单化,用户需求多样化和网络服务主动化	是
ACF	否	协议栈及网络设备	强	中	控制网络行为、提高网络可靠性	是
Self-NET	是	协议栈及网络设备	强	低	分布式系统的自管理	是

3 一个多 MDE 环结构的认知网络框架:超网络(Super-NET)

现有网络存在无法有效抵御恶意攻击,不能提供跨网服务,缺乏自适应能力,需要过多人工干预,难以管制复杂性等问题,暴露出其在安全性、可靠性、集成性和适应性等方面的内在缺陷,无法适应以无线、宽带、移动和 IP 化为主要特征的下一代网络的发展需求,迫切需要新理论、新方法和新技术克服上述难题。

针对此问题,我们在前期的研究中已经初步提出了一个

比较具有普遍意义的认知网络框架^[42]。在此基础上,面向网络用户的个性化需求和特殊领域的特定需求,结合高可信、高集成、高适应和高性能的下一代网络的发展目标,本文提出一个联系网络上下层的、多 MDE 环结构的认知网络框架:“超网络”。所谓“超网络”就是在传统网络的基础上,利用认知网络技术构建的虚拟网或者说是逻辑网。它不但可以提供传统的通信服务,而且能够根据终端需求和环境变化对服务能力、网络能力及通信能力进行全方位、多角度的跨层次感知,实时动态地选择接入网络和接入方式,为用户提供最/次优化服务,从而使传统网络角色由被动信息承载者转变为主动服务提供者。我们将超网络中的这种具有自适应能力的接入方式称之为超接入,而具有超接入能力的终端节点被称为超终端。超网络并不是从根本上推翻现有网络基础设施,而是要用新理论、新方法和新技术改进和整合现有的无处不在的网络,消除不同网络类型间的鸿沟,实现网络系统的集成化和统一化,对用户表现出高度的认知能力。

3.1 超网络认知单元

认知单元是超网络认知能力实现的先决条件,为超网络认知过程提供现实载体和基础元素。超网络认知单元是一个由认知策略库驱动的网络控制单元,包括域认知环 MDE (Monitor-Decide-Execute) 和相应的“自管理”行为调用接口,结构如图 6 所示。MDE 包含检测(Monitor)、决策(Decide)和执行(Execute)等组件,通过传感器收集特定网络域内网络元素的信息并进行分析和推理,生成相应操作指令序列,经过“自管理”行为调用接口指导网络实体实现自容忍、自配置、自优化和自撤销等行为。网络状态的变化经内部反馈机制再次被 MDE 所感知,每一认知层由一系列超网络认知单元组成,分为局部认知单元和全局认知单元。局部认知单元在一个较小范围(通常为一个或几个网络元素),在无人干预或较少人为干预下,指导相应 MDE 结构使系统任务目标获得局部最优解;全局认知单元负责众多局部认知单元进行协调和统筹,以获得全局最优/次优解。超网络认知单元的实现减少了网络系统对系统信息的获取时延和开销。

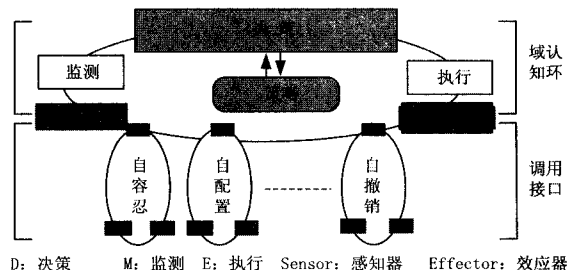


图 6 基于多 MDE 的超网络认知单元

3.2 超网络框架

以超网络认知单元为基础,采用分层设计方法构建超网络系统架构,根据资源感知、认知目的及个性化服务需求的不同将超网络架构分为 3 个子层:接入认知子层、网络认知子层和服务认知子层,如图 7 所示。

接入认知子层:负责对不同传输信道的认知。接入认知子层支持多种传输信道的接入,通过转换协议将众多通信资源进行抽象并统一,在此基础上根据通信需求(如高可信或高可用)选择不同的接入信道,使超网络具有信道接入的认

知能力。

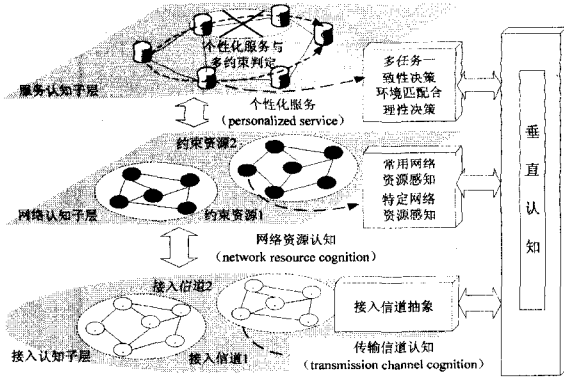


图7 超网络框架

网络认知子层:负责对常用网络资源的认知。网络认知子层通过对流量、最短路由、最小时延路由等常用网络资源,或高可信路由等特种网络资源的感知来满足系统动态扩展网络资源、优化资源、增强网络动态适应性等各种需求。

服务认知子层:负责对环境变化和服务需求的认知。网络技术的发展已经使个性化服务成为未来网络服务的核心标志与能力,服务认知子层根据对环境信息和服务需求的感知,实现网络系统多任务一致性与环境匹配合理性的决策与认知。该认知子层能够协助个性化服务策略的制定,增强在复杂环境下对海量的、不完整的甚至恶意的信息的智能决策。此外,也为超网络系统的服务发现、服务选择及服务优化等目标的实现提供了现实基础。

以上3个认知子层之间还存在一个垂直认知层,它可以实现跨层感知,以满足特殊任务需求或多目标决策的需要。

3.3 基于PEPA和ODEs的Super-NET分析方法

Super-NET不但可以提供高效的个性化服务,还必须保障高可信和高适应等特征。而当前以自然语言和框图为主的网络描述手段已经难以满足Super-NET的建模需求,迫切需要一种既支持模型验证又具有性能分析能力的形式化描述与分析方法,以在减少模型漏洞和错误的同时,提供严谨和高效的模型分析能力。

为了满足Super-NET对超接入、跨层感知和多目标自动选择的需求,本文尝试从不同认知网络域和不同认知层次进行描述,形成具有松耦合关系的常微分方程组(ODEs),根据ODEs的解集自动进行决策,进而实时调整网络配置,智能地适应目标需求和环境变化。

网络系统认知模型可以抽象为一个四元组 $(Layer, Objects, \rho, Domain)$ 。其中 $Layer = \{layer_1, layer_2, \dots, layer_m\}$ 代表网络分层的集合, $C_j = C(layer_j)$ 表示第 j 层的认知层。 $Objects = \{object_1, object_2, \dots, object_k\}$ 代表网络单一需求目标的集合,是对复杂目标的分解,满足任意目标 $object_k$ 仅与某一特定网络层相关联,它们之间满足关联函数 $\rho: object_k \rightarrow C_j$ 。不满足上述映射的称为多目标,可以表示为多个单一目标的并: $objects_{s1} \cup objects_{s2} \cup \dots \cup objects_{sq}$ 。Domain代表认知网络域的集合,每一个子网 i 被称为认知网络域 Domain i 。

从服务角度进行建模,把网络系统分为超终端 Request 和服务端 Response。超终端包含完整的认知环 MDE,对目标 $k \in Objects$,可以表述为 $Request_k^i$,主要进程如图8所示。

超终端:

.....
 Monitor = (monitor, m), Decision
 Decision = (decide, r_2), Execution + (learn, r_3), Decision
 Execution = (execute, r_4), Monitor + (service1, s_1), Monitor + (service2, s_2), Monitor + ... + (service $_m$, s_m) Monitor

图8 超终端用户的PEPA描述

服务端进程表示为 $Response_j^i$,其中 $i \in Domain, j \in C(layer_i)$,且满足 $\rho: k \rightarrow j$ 。需要指明的是不同的 Domain 对应的进程动作转移概率和进程数量不尽相同。综上,若 service 是所有可能的服务交互的集合,则该认知过程可以抽象为式(1)。

$$Request_k^i || \{service^k\} Response_j^i \quad (1)$$

针对 Super-NET 目标集 Objects,建立一组 PEPA 模型,如式(2)所示。

$$Model_{cognitive} = \{ \zeta | \zeta(k) = Request_k^i || \{service^k\} Response_j^i \} \\ k \in Objects, j \in \{C(layer_1), C(layer_2), \dots, C(layer_p)\}, \\ i \in Domain \quad (2)$$

利用连续状态空间近似的方法对 PEPA 模型的状态空间进行向量化处理,其中每一个方程如式(3)所示。

$$\frac{dv_{ij}(t)}{dt} = - \sum_{\alpha \in Exit(C_j)} \rho_{\alpha}(C_j, P(t)) + \sum_{\beta \in Enter(C_j)} \rho_{\beta}(C_k, P(t)) \\ j=1, 2, \dots, N_i, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, $N(C_j, t)$ 记录了在时刻 t 组件类型 C_i 第 j 个派生实例的个数, $Exit(C_j)$ 表示从 $N(C_j, t)$ 发出动作的集合, $Enter(C_j)$ 表示进入 $N(C_j, t)$ 动作的集合,转移概率 $\rho_{\alpha}(C_j, P(t))$ 代表在系统 $P(t)$ 中当动作 α 发生时 C_j 组件减少的概率。

因此,每个 PEPA 模型生成固定数量的常微分方程,整个 Super-NET 模型转化为一组编号为 (k, j, i) 的 ODEs,模型分析过程如下。首先,根据分析目标的不同,例如高性能、高可信、高适应和最短路由等目标,确定模型的 k 值,进而选取一系列编号为 $(k, *, *)$ 的 ODEs。接着,把超终端和服务端具有的服务资源抽象为一个资源向量 X ,作为选定 ODEs 的初始条件。然后,求解对应的 ODEs 得到 $m * n$ 个解向量,其中 m, n 分别为网络层数与认知网络域个数。最后,根据解向量判定目标的满足程度。此外,多目标问题与单目标相似,只需把多目标看作单目标的并集。

本文提出的 Super-NET 分析方法与常用形式化方法相比,具有如下几个优点:首先,由于不再采用 PETRI 网和传统进程代数等依赖的隐含马尔可夫链作为分析手段,当模型的空间状态巨大时,避免了空间爆炸的问题,这对于可能包含数以亿计甚至十亿计网络节点的 Super-NET 而言尤为重要。其次,直接采用 ODEs 建模时,对应的语义关系比较模糊且模型更改开销较大,因此采用 Hillston 等人的一项最新突破,把 PEPA 转化为 ODEs,在建模的简便性与分析的有效性之间取得平衡^[49]。此外,对任意单一目标的分析,仅对应于 $m * n$ 个方程组的求解,具有良好的求解性能,而且稍加改变也可应用于其它认知网络的分析。

3.4 认知能力的分层

目前认知网络的研究已经成为下一代网络研究的重点。超网络是认知网络研究的一个特例,根据以上分析得出,超网

络架构的实现离不开两项最为基本的认知能力,即低层次的自律能力和高层次的认知能力。自律计算技术可以解决网络系统的自身管理问题并使自律属性成为系统的本质属性,而由认知计算技术赋予系统的认知属性是一种高层次的认知能力,是对自律属性的扩展和延伸。

自律神经系统可在无大脑意识控制的条件下自动地管理人体的许多关键功能,受这一思想的启发,IBM资深副总裁PAUL HORN于2003年3月份首次提出自律计算的概念,即在无需人工干预的情况下,根据系统的内外需求变化动态地、主动地调整软、硬件资源,实现计算机系统的“自配置”、“自优化”、“自修复”和“自保护”,最终实现“用技术管理技术”,解决日益复杂的计算环境中所面临的管理与成本问题。IBM“自律计算”旨在单机层面上引入自管理、自配置、自优化、自恢复等生物自律机制以解决系统管理复杂性问题,这与认知网络的核心思想相吻合。伴随自律计算思想从单机到网络的延伸,当超网络系统具备自律计算的“四自”基本特性时,网络系统便具备了或者部分具备了低层次的生物自律能力,自律计算必将成为实现超网络系统的基本技术,生物自律特性也必将成为超网络的基本属性。

认知计算是从目标导向、上下文感知、用户需求和自适应等高层次的角度通过记忆、学习、决策和分析等手段使网络系统具备一定的认知能力。认知计算的核心思想是主动感知网络状态和外部环境的变化,利用感知的状态信息和外部环境信息对网络可配置元素进行正确的规划、判决和执行,实现网络系统对应用服务能力、网络能力及通信能力进行全方位、多角度和多层次感知,为用户提供最/次优化服务,从而使传统网络角色由被动信息承载者转变为主动服务提供者。不少国内外学者从认知过程的角度来研究认知网络,认为认知过程符合OODA(Observe-Orient-Decide-Act)模型,并将认知过程抽象为5个基本要素:环境、感知、规划、决策、执行;环境是认知过程的驱动力量和感知对象,也是认知过程的最终归宿,认知过程最终要反作用于环境,达到网络系统和应用环境的统一。

4 挑战与展望

目前对于认知网络的研究集中在框架结构等方面,缺乏认知网络研究的理论基础和具有普遍意义的体系结构模型,这不利于研究的进一步深入开展^[44-52]。体系结构研究规律有4个阶段:“框架结构”→“模型及评价”→“体系结构”→“设计与应用”。目前认知网络的研究仍处于第一个发展阶段,也就是面向特定领域而提出不具有通用意义的框架结构,大多数做法是根据与网络相关的、明确的工程决策问题在网络中融入认知功能,该阶段属于认知网络的朦胧发展阶段;第二个阶段根据第一个阶段所提出的各种框架结构,抽象共性特点,提炼认知网络理论模型,研究认知网络的评价方法,使认知网络的研究有据可依,并为其深入开展奠定理论基础;第三个阶段则根据理论模型和评价方法重新审视与改进认知网络体系结构,为下一个阶段的认知网络设计奠定基础;第四个阶段则是认知网络开始走向实际应用的实践验证阶段,是认知网络走向成熟的标志。当前认知网络的研究正处于第一阶段,提出了几种具有代表性的认知网络框架,如Motorola的FOCALE框架等,这些框架的共性之一就是使认知网络体系结

构既可蕴含当前网络技术又可融入尽可能多的下一代网络技术^[53-59]。因此鉴于第一个阶段认知网络的发展状况,已经具备了进行理论模型和评价方法研究的初步基础,但是目前还没有此类研究的成果出现。纵观前人研究成果及自身发展规律,认知网络的研究在各个方面仍面临着诸多挑战,制约认知网络研究深入开展并亟需解决的5个方面归纳如下。

(1)认知网络体系结构及认知能力的研究仍处于初步阶段,如何抽取已有体系结构的共性问题建立一个普遍意义的理论模型存在不少困难。这是因为已提出的认知网络体系结构还不足以涵盖下一代网络的大部分领域,而且目前对有哪些技术属于下一代网络技术范畴还没有一个清晰完整的认识,因此在此基础上提炼的体系结构或者理论模型距离实际应用还具有较大的差距。

(2)认知网络的认知能力是由内外环境目标驱动的,如何将这些环境信息转化为认知网络所理解的目标语言也是亟须解决的关键问题之一。然而,目前的研究集中于特定领域的认知网络知识表示方面,没有标准的形式化语言。

(3)认知网络“具有哪些认知特征?”、“认知能力如何?”等评价工作是亟需解决的问题。现有文献仅从认知网络定义、框架结构等展开,缺乏理论模型、定量评价等基础性工作,难以有效地指导认知网络研究的开展。

(4)IBM的自律计算技术在单机层面上取得一定的成功,在网络层面上运用自律计算思想解决认知网络的自律性问题亦展示了美好的前景。但是机械地挪用单机或者集群的自律计算方法和技术到网络层面还具有很多困难,例如认知网络的设备数目和自律单元数目要比单机自律计算更多、更独立,由其感知器感知的数据比单机自律计算更加局部,因此认知网络的目标实际是在严重缺乏全局信息的情况下进行整个网络范围的多目标优化过程。这种缺乏信息的多目标优化问题非常复杂,是一个NP-hard问题。

(5)对机器学习研究领域提出了新的挑战。在自律计算研究领域中的传统机器学习和优化模式在认知网络领域中并不适用,其中任何认知环的认知能力均是一种局部认知能力,而全局认知能力是大量认知环相互作用的结果,并不是局部认知能力的简单叠加,因此需要研究设计新的机器学习方法来解决网络整体的认知问题。

结束语 作为下一代网络发展的趋势,认知网络研究还处于起步阶段,亟需深入开展。本文在分析国内外研究工作的基础上,对认知网络的来源、现状和趋势进行系统归纳,对典型的认知网络框架进行深入剖析。在此基础上,提出了一个突破特定领域限制、支持形式化推理与量化分析的多级反馈控制认知网络框架结构,为认知网络研究的深入开展奠定了一定的基础。最后,结合认知网络体系结构的研究现状,系统地梳理了构建认知网络系统的关键技术和制约认知网络研究深入开展的基本问题,为认知网络的建模和评价奠定了一定基础。

参考文献

- [1] Agoulmine N, Balasubramaniam S, Botvitch D, et al. Challenges for Autonomic Network Management[C]//First Conference on Modelling Autonomic Communication, Dublin, Ireland, 2006: 1-20
- [2] Albayrak S, Bur K, Toker A. Network economy in service-and

- context-aware next generation mobile networks[C]//18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, Sept. 2007; 1-5
- [3] Jennings B, van der Meer S, Botvich D, et al. {Jennings, 2007 # 80}[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(10): 112-121
- [4] Boscovic D. Cognitive Networks[D]. Motorola Technology Position Paper, 2005
- [5] Dimitrakopoulos G, Tsagkaris K, Demestichas K, et al. A Management Scheme for Distributed Cross-layer Reconfigurations in the Context of Cognitive B3G Infrastructures [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(18): 3807-3822
- [6] Ramming C. Cognitive networks [C]// Proceedings of DARPA/Tech Symposium. Anaheim, CA, USA, March 2004; 9-11
- [7] Thomas R W, DaSiva L A, MacKenzie A B. Cognitive Networks [Z]. *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. 2005; 352-360
- [8] Thomas R W, Friend D H, Dasilva L A, et al. Cognitive Networks; Adaptation and Learning to Achieve End-to-End Performance Objectives[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(12): 51-57
- [9] Kephart J, Chess D. The Vision of Autonomic Computing[J]. *Computer*, 2003, 36(1): 41-50
- [10] White S R, Hanson J E, Whalley I, et al. An Architectural Approach to Autonomic Computing[C]//Proceedings of the International Conference on Autonomic Computing (ICAC'04). NY, USA, May 2004; 2-9
- [11] Fortuna C, Mohorcic M. Trends in the Development of Communication Networks; Cognitive Networks [J]. *Computer Networks*, 2009, 53(9): 1354-1376
- [12] Wyglinski A M. Cognitive Radio Communications and Networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 30-31
- [13] Schmid S, Sifalakis M, Hutchison D. Towards Autonomic Networks[C]//Proceedings of the 1st IFIP TC6 Conference on Autonomic Networking (AN2006). Paris, France, Sep. 2006; 1-11
- [14] Balamuralidhar P, Prasad R. A Context Driven Architecture for Cognitive Radio Nodes[J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 45(3): 423-434
- [15] Lee G, Faratin P, Bauer S, et al. A User-Guided Cognitive Agent for Network Service Selection in Pervasive Computing Environments[C]//Proceedings of the 2nd IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications. Orlando, FL, USA, Mar. 2004; 219-228
- [16] 林闯, 魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. *软件学报*, 2002, 13(2): 203-213
- [17] 李梦君, 李舟军, 陈火旺. 基于进程代数安全协议验证的研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(7): 1093-1103
- [18] Sutton P, Doyle L, Nolan K. A Reconfigurable Platform for Cognitive Networks[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communication. Mykonos Island, Greece, June 2006; 1-5
- [19] Xie Jiang, Howitt I, Raja A. Cognitive Radio Resource Management Using Multi-Agent Systems[C]//Proceedings of the 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, Nevada, USA, June 2007; 1123-1127
- [20] Marojevic V, Reves X, Gelonch A. Cooperative Resource Management in Cognitive Radio[C]//IEEE International Conference on Communications. Glasgow, Scotland, June 2007; 5953-5954
- [21] Shepard B, Matuszek C, Fraser C B, et al. A Knowledge Based Approach to Network Security: Applying Cyc in the Domain of Network Risk Assessment[M]. Menlo Park, CA, Cambridge, MA, London, AAAI Press, MIT Press, 1999
- [22] Strassner J. The Role of Autonomic Networking in Cognitive Networks[M]. *Cognitive Networks; Towards Self-Aware Networks*, 2007; 23-52
- [23] Mahonen P, Petrova M, Riihijarvi J, et al. Cognitive Wireless Networks; Your Network Just Became a Teenager[C]//Proceedings of the 25th Conference on Computer Communications. Barcelona, Catalunya, Spain, April 2006; 23-29
- [24] Mahmoud Q. Cognitive Networks; Towards Self-Aware Networks[M]. Wiley-Interscience, 2007
- [25] Shakkottai S, Rappaport T, Karlsson P. Cross-layer Design for Wireless Networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10): 74-80
- [26] Srivastava V, Motani. Cross-layer Design ; A Survey and the Road Ahead [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(12): 112-119
- [27] Giambene G, Kota. Cross-layer Protocol Optimization for Satellite Communications Networks; A Survey [J]. *International Journal of Satellite Communications*, 2006, 24(5): 323
- [28] Clark D D, Partridge C, Ramming J C, et al. A Knowledge Plane for the Internet[C]//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2003; 3-10
- [29] Kliazovich D, Granelli F, da Fonseca N L S. Architectures and Cross-Layer Design for Cognitive Networks[Z]
- [30] 闫丹凤, 杨放春. 下一代网络业务管理服务器[J]. *计算机工程*, 2007, 33(15): 118-120
- [31] 王兴伟, 王琦, 黄敏, 等. 一种基于模糊积分和博弈论的 QoS 组播路由机制[J]. *软件学报*, 2008, 19(7): 1743-1752
- [32] 孙志刚, 苏金树. 具有 $O(N^2)$ 复杂性的输入缓冲队列加权调度算法[J]. *计算机研究与发展*, 2002, 39(5): 548-550
- [33] 高茜, 罗军舟. 区分服务网络中 IP 多播: 问题与解决方案[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(5): 823-829
- [34] 杨鹏, 吴家皋. 网络服务体系结构及其形式化模型的研究[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(7): 1115-1122
- [35] Melcher B, Mitchell B. Towards an Autonomic Framework; Self-configuring Network Services and Developing Autonomic Applications[J]. *Intel Technology Journal*, 2004, 8(4): 279-290
- [36] Strassner J, Agoulmine N, Lehtihet E. FOCAL: A Novel Autonomic Computing Architecture[C]//Proc. of Latin American Autonomic Computing Symposium. Campo Grande, MS, Brazil, July 2006
- [37] Clark D, et al. New ARCH: Future Generation Internet Architecture[M]. Storming Media, 2004
- [38] Wang M, Suda T. The Bio-networking Architecture; A Biologically Inspired Approach to the Design of Scalable, Adaptive, and Survivable/Available Network Applications[C]//Proceedings of the 1st IEEE Symposium on Applications and the Internet (SAINT). San Diego, CA, USA, August 2001; 43-53
- [39] Brachman R, Advanced D. A DARPA Information Processing Technology Renaissance; Developing Cognitive Systems [Z]. 2002

- [20] Cao J, Jarvis S A. ARMS: An agent-based resource management system for grid computing[J]. *Scientific Programming*, 2002, 10:135-148
- [21] Buyya R, Abramson D, Giddy J, Nimrod/G: An Architecture for a Resource Management and Scheduling System in a Global Computational Grid[J]. *Computer*, 2000; 1-7
- [22] Chapin S J, Katramatos D, Karpovich J, et al. Resource Management in Legion[J]. *Future Generation Computer Systems*, 1999, 15(5):583-594
- [23] Chen Y, Sun X. STAS: A Scalability Testing and Analysis System[C]//2006 IEEE International Conference on Cluster Computing. 2006; 1-10
- [24] Lyon G, Kacker R, Linz A. A scalability test for parallel code[J]. *Software: Practice and Experience*, 1995, 25(12):1299-1314
- [25] Liu C L, Layland J W. Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard Real-time Environment[J]. *J. ACM*, 1973, 20(1):46-61
- [26] Schmid U, Blieberger J. Some investigations on FCFS scheduling in hard real-time applications[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 1992, 45(3):493-512
- [27] Homayoun N, Ramanathan P. Dynamic priority scheduling of periodic and aperiodic tasks in hard real-time systems[J]. *Real-Time Systems*, 1994, 6(2):207-232
- [28] Biyabani S R, Stankovic J A, Ramamitham K. The Integration of Deadline and Criticalness in Hard Real-Time Scheduling[C]//Real-Time Systems Symposium. 1988
- [29] Jensen E D, Locke C D, Tokuda H. A Time-driven Scheduling Model for Real-time Operating Systems[C]//IEEE Real-Time Syst. Symp. 1985; 112-122
- [30] Buttazzo G, Spuri M, Sensini F. Value vs. deadline scheduling in overload conditions[C]//Proceedings of the 16th IEEE Real-Time Systems Symposium. 1995
- [31] 金宏, 王宏安, 王强, 等. 一种任务优先级的综合设计方法[J]. *软件学报*, 2003, 14(3):376-382
- [32] 王永炎, 王强, 王宏安, 等. 基于优先级表的实时调度算法及其实现[J]. *软件学报*, 2004, 15(3):360-370
- [33] 黄德才, 钱能. 多机相关任务均衡调度问题的复杂性与新算法[J]. *计算机工程与科学*, 2000, 22(2)

(上接第 16 页)

- [40] Schmid S, Sifalakis M, Hutchison D. Towards Autonomic Networks[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4195:1-11
- [41] Baumgarten M, Bicocchi N, Kusber R, et al. Self-organizing Knowledge Networks for Pervasive Situation-aware Services[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Quebec, Canada, October 2007; 1-6
- [42] Wang Hui-qiang, Feng Guang-sheng, Zhao Qi-an, et al. Progress of Research on Cognitive Networks[M]. *Sciencepaper Online*, 2009
- [43] Hillston J. Fluid flow approximation of PEPA models[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Quantitative Evaluation of Systems. Torino; IEEE Computer Society Press, Sep. 2005; 33-42
- [44] Katsuno Y, Aihara T. Autonomic Network Configuration for Networkable Digital Appliances[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(2):494-500
- [45] Devroye N, Mitran P, Tarokh V. Achievable Rates in Cognitive Radio Channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(5):1813-1827
- [46] Sahai A, Hoven N, Tandra R. Some Fundamental Limits on Cognitive Radio [C]//Forty-second Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, Israel, October 2004; 1-11
- [47] Jovicic A, Viswanath P. Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective [OL]. <http://www.ifp.uiuc.edu/~jovicic/JV06.pdf>, June 2006
- [48] Koulouriotis D E, Diakoulakis I E, Emiris D M, et al. Development of Dynamic Cognitive Networks as Complex Systems Approximators: Validation in Financial Time Series[J]. *Applied Soft Computing*, 2005, 5(2):157-179
- [49] Thomas R W, Friend D H, Dasilva L A, et al. Cognitive Networks: Adaptation and Learning to Achieve End-to-End Performance Objectives [J]. *Communications Magazine*, 2006, 44(12):51-57
- [50] Kephart J O. Research Challenges of Autonomic Computing[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Software Engineering. Missouri, USA, May 2005; 15-22
- [51] Strassner J. Autonomic Networking: Theory and Practice[C]//Proceedings of 2008 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symp. Salvador, Brazil, April 2008; 786-786
- [52] Hinchey M, Sterritt R. Autonomicity-an Antidote for Complexity? [C]//Proceedings of Computational Systems Bioinformatics Conference, Workshops and Poster Abstracts. Stanford University, Aug. 2005; 283-291
- [53] Gelenbe E, Lent R. Power-aware Ad-hoc Cognitive Packet Networks[J]. *Ad-hoc Networks*, 2004, 2(3):205-216
- [54] Gelenbe E, Lent R, Xu Z. Measurement and Performance of a Cognitive Packet Network[J]. *Computer Networks*, 2001, 37(6):691-701
- [55] Gelenbe E, Lent R, Xu Z. Design and Performance of Cognitive Packet Networks[J]. *Performance Evaluation*, 2001, 46(2/3):155-176
- [56] Hey L A. Reduced Complexity Algorithms for Cognitive Packet Network Routers[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(16):3822-3830
- [57] Koulouriotis D E, Diakoulakis I E, Emiris D M, et al. Development of Dynamic Cognitive Networks as Complex Systems Approximators: Validation in Financial Time Series[J]. *Applied Soft Computing*, 2005, 5(2):157-179
- [58] Rondeau T W, Bostian C W, Bruce A F. Cognitive Techniques, Physical and Link Layers[M]. *Cognitive Radio Technology*. Newnes; Burlington, 2006; 219-268
- [59] Smith J M, Bruce A F. Cognitive Techniques; Network Awareness[M]. *Cognitive Radio Technology*. Newnes; Burlington, 2006; 299-311