

未来互联网体系的研究现状、热点与探索实践

权伟*, 张宏科*

北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室, 北京 100044

* 通信作者. E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn, hkzhang@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-15; 接受日期: 2017-05-08; 网络出版日期: 2017-05-31

国家自然科学基金 (批准号: 61602030, 61232017)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFE0122900) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2016RC036) 资助项目

摘要 随着互联网用户数量和应用规模的不断扩张, 其原始设计在安全性、移动性和可扩展性等方面问题日益凸显, 世界各国争相探索研究未来的互联网体系, 旨在从根本上解决互联网原始设计弊端. 本文阐述了作者对未来互联网体系研究的总结和主要观点: 首先, 从互联网关键问题出发, 分析了构建新互联网体系的必要性和面临主要挑战, 总结了未来互联网体系的研究现状. 接着, 评述了未来互联网发展趋势和当前若干新兴热点技术, 如 SDN, NFV, NS 和 ICN 等. 最后, 介绍了作者提出的以协同标识为特征的新型互联网体系架构, 以及为我国未来互联网体系研究和发展所进行的相关探索.

关键词 互联网弊端, 未来网络, 网络体系, 智慧协同标识网络

1 概述

现有互联网用户数量和应用规模不断扩大, 其原始设计思想受到严重挑战, 逐渐暴露出安全性、移动性、可扩展性差等严重问题, 使得现有互联网无法满足经济与社会发展对信息网络的重大迫切需求. 为了缓解互联网存在的问题, 国内外学者陆续提出了许多“增量式”改进方案. 然而, 持续的“打补丁”方式使得原来简单的体系结构和机制变得复杂, 造成网络可管性受限、灵活自适应性降低, 同时增加入侵风险等^[1]. 因此, 国际上陆续开始超前地、跨越式地重新构思和设计新互联网体系来适应未来互联网发展^[2].

构建新型互联网体系是业界目前公认的一项科学难题, 也是当前世界各国信息网络领域争相研究的焦点^[3,4], 面临多重技术挑战: 难以探索并找到互联网原始设计严重弊端的根源; 难以短时间对新网络体系与机制的科学性、合理性验证分析; 特别地, 从本质上有效综合解决现有互联网各种严重弊端充满挑战; 尤其是大范围、大规模的系统应用部署极具挑战. 据作者目前调研, 至今尚未见到任何一种

引用格式: 权伟, 张宏科. 未来互联网体系的研究现状、热点与探索实践. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 804-810, doi: 10.1360/N112017-00059
Quan W, Zhang H K. Future Internet architecture: research status, hot topics, and development practice (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 804-810, doi: 10.1360/N112017-00059

综合有效解决上述问题的新型网络系统, 相关研究仍处于起步阶段, 众多设计方案有待进一步分析和验证, 规模部署与应用仍还需时间.

本文对国内外未来互联网体系研究现状进行总结, 分析了未来互联网体系的发展趋势和若干新兴热点技术, 并对我国未来互联网体系研究提出了发展建议和参考方案.

2 未来互联网体系研究现状

针对互联网面临着安全性、移动性、可扩展性差等诸多问题, 国内外各研究机构相继开展了对未来信息网络体系架构的相关研究, 并针对其发展制定了相应的宏观决策、设立了一系列研究计划, 力图抢占未来信息网络领域的制高点.

代表性地, 美国自然科学基金委 NSF (National Science Foundation) 资助 FIND 计划¹⁾, 旨在推动新型网络基础设施的研究, 其赞助的课题包括安全性设计、可靠性设计、可管理性设计、新的无线传感网络和光纤网络以及网络体系结构理论等未来互联网的多个方面. 2005 年, 美国 NSF 启动了全球网络创新环境 GENI (Global Environment for Network Innovations) 计划²⁾. GENI 引入了切片化、虚拟化和可编程的设计思想, 其目标是发现和评估互联网基础的新的革命性概念、示范和技术, 建立一个用于研究未来互联网体系结构、服务和过渡的实验环境. 2010 年, 美国 NSF 连续资助 FIA 计划中的 4 个未来互联网体系结构项目³⁾. 2012 年, ChoiceNet⁴⁾ 申请并纳入 FIA 计划, 成为第 5 个子项目. 同年, 为了进一步完善信息网络与应用的基础研究, 美国启动了“US IGNITE”计划⁵⁾. 在此基础上, 2014 年 FIA 获得 NSF 的滚动资助, 成立了 FIA-NP. 2015 年, 美国陆军又启动 WIN-T 项目.

与此同时, 欧洲多个国家也开展未来网络体系架构的研究. 欧盟 FP6 (6th Framework Programme) 致力于未来网络技术和系统体系结构的研究, FP7 (7th Framework Programme) 则启动了未来互联网研究计划 FIRE⁶⁾, 在支持未来网络新方法研究的同时, 重点资助相关原型系统的开发. 该计划拟从技术、经济和社会等方面综合考虑重新设计一个具有自律性的未来互联网. 2014 年, FP7 陆续启动了一系列 H2020 项目, 包括 H2020-ICT 和 H2020-SEC. 2017 年, FP7 进一步设立 H2020-FI 等. 部分主要研究项目如表 1 所示.

在亚洲, 2006 年日本启动了 AKARI 计划⁷⁾, 设计全新的互联网体系架构. 接着, 建立 AsiaFI⁸⁾ 论坛促进亚洲国家与其他洲在未来互联网研究方面的合作. 我国也较早地开始对未来信息网络体系结构和关键技术的研究, 国家中长期发展规划将其作为优先发展领域. 代表性项目如表 2 所示. 国家自然科学基金委员会也陆续启动了“未来网络体系结构与关键技术”、“后 IP 网络体系结构及其机理探索”等一系列重点项目. 与此同时, 一批国内科研人员投入到国家未来网络创新平台 CENI 的建设中.

3 热点技术与发展趋势

诸多创新研究为未来互联网体系结构走向稳定成熟奠定了基础. 在世界各国重大计划的支持下,

1) FIND (Future Internet Design). <http://www.nets-find.net/index.php>.

2) GENI(Global Energy Network Institute). <http://www.geni.net>.

3) Future Internet Architecture. <http://www.nets-fia.net>.

4) ChoiceNet Project. <https://code.renci.org/gf/project/choicenet>.

5) US IGNITE. <http://us-ignite.org>.

6) FIRE. <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire>.

7) AKARI. <http://akari-project.nict.go.jp/eng/index2.htm>.

8) Asia Future Internet Forum. <http://www.asiafi.net>.

表 1 国外主要研究项目 (部分)
Table 1 Some major research projects abroad

Year	Region	Organization	Project
2006	USA	NSF	FIND (Future Internet Design)
2007	EU	FP7	FIRE (Future Internet Research and Experiment)
2010	USA	NSF	FIA (Future Internet Architecture)
2012	EU	FP7	FIRE (in Call 8)
2012	USA	the White House	US IGNITE
2012	USA	NSF	CNS (Computer and Network Systems)
2013	EU	FP7	FIRE (in Call 10)
2014	EU	FP7	H2020-ICT (Information Communication Technology)
2014	USA	NSF	FIA-Next Phase
2015	USA	United States Army	WIN-T (Warfighter Information Network-Tactical)
2016	EU	FP7	H2020-SEC (Network Security)
2017	EU	FP7	H2020-FI (Future Internet)

表 2 国内主要研究项目 (部分)
Table 2 Some major research projects in China

Year	Project	Name
2007	973	Fundamental Research on Universal Network and Pervasive Services ^[5]
2007	973	Fundamental Research on Multi-Domain Collaboration for Broadband Wireless Communications
2007	973	Fundamental Research of Measurable, Controllable and Manageable IP Network ^[6]
2009	973	Fundamental Research on New Generation Internet Architecture and Protocols ^[7]
2009	973	Research on Basic Theory and Key Technology of Cognitive Ratio Network
2010	973	Information Service Model and Basic Research
2011	973	Research on Service-Oriented Networking Architecture and Mechanism
2011	973	Research on Reconfigurable Information Communication Basal Network Architecture ^[8]
2013	973	Fundamental Research on Intelligent Collaborative Broadband Wireless Network
2013	973	Fundamental Research on Theories of Smart and Cooperative Networks ^[9]
2015	Innovation Team Project	Research on Basic Theory of Mimic Defense
2015	863	Key Technology and Demonstration of Universal Identifier Network
2016	National Science & Technology Major Project	Space-Air-Ground Integrated Network Information Security Technology

业界逐渐形成一些热点技术, 如美国 GENI 项目资助的 SDN、欧盟 ETSI 提出 NFV、美国 FIA 资助的 NDN 等. 代表性方案如下:

(1) 软件定义网络 (Software Defined Network, SDN): SDN 核心技术思想是通过将控制层面与数据层面解耦、集中式软件管理以及可编程化操作等实现网络功能可定制和网络流量的高效、灵活的管理, 从而得到网络性能优化与提升. 目前在中小规模网络中已得到验证. 但是, 一些技术问题仍需进一

步研究,如:北向接口的标准化、网络复杂度与功能的折中问题、集中控制的安全性,以及现网中大规模部署等。

(2) 信息中心网络 (Information Centric Networking, ICN): ICN 设计思想是通过“以信息为中心”来取代原来的“以地址为中心”,提供一种高效可靠的内容分发模式,来满足未来海量数据通信需求。在以信息为中心的网络体系结构研究中,美国 FIA 计划资助的 NDN (Named Data Networking)^[10] 得到广泛的研究。NDN 以“内容名称”转发取代了现有互联网的基于 IP 转发,对内容进行唯一命名,并在路由器中实现缓存功能,从而可有效提升用户体验,提高网络效率。然而,ICN 内容缓存会带来内容的安全性问题,海量内容命名带来的路由可扩展问题以及大规模推广部署等都需进一步考虑。

(3) 网络功能虚拟化 (Network Function Virtualization, NFV): 欧洲电信标准化组织 ETSI 提出 NFV 网络架构,解决运营商网络管理设备高成本、高能耗的问题。NFV 通过功能抽象以及软件/硬件解耦,解除网络功能与专用硬件的依赖,使得网络服务可扩展,提高设备使用效率,节能和节省开销,同时能够实现资源的灵活共享、新业务的高效便捷迁移等。然而,NFV 自身带来的网络稳定性、功能复杂性、大规模可部署性、可移植性和互通性等问题需要进一步分析。

(4) 网络切片 (Network Slicing, NS): NS 概念提供一种端到端的解决方案,允许使用一个通用网络基础设施来创建虚拟网络,允许在每个网络切片中灵活地配置和重用网络元件和功能,以满足特定的应用要求。NS 可以使未来网络支持更灵活的网络应用,满足不同服务和业务的需求。但是,网络切片的动态管理、切片的资源共享、切片的业务分离等问题都仍需进一步解决。

信息技术的不断发展使得人类对网络的需求多种多样且瞬息万变。任何一种静态、僵化、固定的网络体系均难以彻底地解决互联网存在的各种问题,满足人类社会对未来网络发展需求。因此,构建智慧、灵活的网络体系,能够融合多种先进技术,动态地适应不同应用环境,实现“以动制动、以变应变”,是未来互联网发展的必然趋势。

4 智慧协同标识网络体系 —— 未来网络探索与实践

针对网络体系智慧灵活化的问题,我国下一代互联网互联设备国家工程实验室团队通过十余年潜心研究,首次提炼出传统互联网具有“横紧纵松、三重绑定”特性,即“横向结构紧耦合”、“纵向结构松耦合”,以及“用户与网络”、“控制与数据”、“资源与位置”绑定,是导致其体系静态、僵化、固定的本质原因。具体地,“横向结构紧耦合”使得路由、转发、计算、存储等功能过渡捆绑,带来网络智能性与可扩展性差;“纵向结构松耦合”使得网络体系各层之间适配复杂,造成服务与网络灵活性与协同差。“用户与网络绑定”使得用户身份和网络地址相同,容易地址欺骗、受攻击,同时用户移动带来网络地址改变,连接建立中断;“资源与位置绑定”导致网络工作负担重,容易造成网络拥塞、用户体验差等问题;“控制与数据绑定”使得网络资源难以被智慧地协同调度,造成网络资源利用率低,能耗高及无法支持服务多元化等。

为了从根源上解决现有互联网体系“横紧纵松、三重绑定”带来的诸多问题,智慧协同标识网络体系 (Smart Identifier Network, SINET) 由我国自主设计并提出^[9]。不同于传统的互联网体系分层结构,SINET 网络体系采用“两域”、“三层”的网络模型。在水平层面,SINET 包含实体域和行为域,这种设计有效地避免了横向结构紧耦合的弊端。在垂直层面,SINET 包含网络组件层、资源适配层和智慧服务层,通过动态解析映射机制,便于实现网络与服务的协同适配。值得提出的是,SINET 的“两域”、“三层”的网络模型是一种互联网体系的最优划分方案,结构简单而又紧凑,为构建完备的未来互联网体系提供了可供参考的方法。

具体来说, SIENT 能够融合多种先进技术, 动态地适应不同应用环境, 实现未来智慧网络中的服务资源的智慧查找和协同获取. 在 SINET 体系中, “网络组件层” 主要包括构建网络的各种物理实体, 其主要完成数据的存储和转发, 以及各个组件的状态感知; “资源适配层” 收集感知到的服务需求以及网络组件的状态, 并动态的分配网络资源以最大化服务需求从而提升用户的体验, 提高网络的利用率; “智慧服务层” 主要产生服务的标识并根据服务的特征对标识进行相应的描述, 另外该层还要完成服务的查找和动态匹配等功能. 通过 “两域”、“三层” 的映射, 灵活地完成网络族群根据服务需求的选择、网络组件与网络族群的匹配, 以及网络组件之间的行为聚类等操作. 此外, 由于 SIENT 体系结构的灵活划分, 有利于实现现有互联网三重绑定的解耦; 采用资源注册和发现机制独立于网络位置, 可解决 “资源与位置” 绑定带来的资源获取低效问题; 采用协议逻辑和网络对象分离机制, 可解决 “控制与数据” 绑定带来的网络静态僵化等问题; 采用用户与网络分离机制, 可解决地址信息绑定带来的移动性、安全性等问题.

目前, SIENT 体系的部分研究已得到国际社会的认可^[11~14]. 智慧协同标识网络系统及部分成果成功应用于电信运营商及高铁、工业制造等行业. 代表性地, 智慧协同标识网络在高铁调度应急专网和铁路运维检修专网等专用环境得到规模应用, 成功解决高铁运行场景中远程视频、语音可靠通信等技术难题, 为动车组的安全运行提供可靠保障; 在最高时速 300 km/h 的京沪高铁上, 通过网络资源感知协同, 可用带宽提升 2.4~5.2 倍, 有效解决高速移动环境下数据高速传输问题; 应用于工业制造领域, 在高密集、多跳物联网环境下, 传输可靠性从 0.79~0.95 提升到 0.95~0.99, 有效解决了极端恶劣工业网络的数据低延时、高可靠传输问题. 值得提出的是, 目前 SIENT 仅仅是完成了第一阶段设计与研究, 取得了初步的研究成果, 应用主要针对专网和局域网场景. 在这种架构下, 针对更广泛的应用场景, 进行多种多样的应用设计和大规模的应用验证, 需要更多同行研究者参与、协作和完善.

我们相信, 智慧协同标识网络作为我国自主研发的互联网体系标志性成果之一, 定将逐步实现向移动车联网、工业互联网、天空地网络、卫星导航等重要产业推进, 满足未来网络发展要求, 助力实现我国网络强国梦.

5 结束语

互联网体系的变革目前正经历着一个白热化阶段. 世界各国争相探索研究未来的互联网体系, 旨在从不同角度解决消除互联网原始设计弊端. 目前逐渐形成了一些主流技术, 如 SDN, NFV, NS 和 ICN 等. 但是, 任何单一技术突破均难以满足未来网络发展的需求. 因此, 本文指出以智慧协同标识网络为代表, 构建智慧、灵活的网络体系, 能够融合多种先进技术, 动态地适应不同应用环境, 实现 “以动制动、以变应变”, 是未来互联网发展的必然趋势. 另一方面, 互联网体系研究是一项耗时耗力的工程, 只有在合理的科学理论与方法论基础上, 进行大量技术储备、大范围地协调, 才能构建出满足人类发展需求的未来互联网体系.

参考文献

- 1 Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: clean-slate versus evolutionary research. *Commun ACM*, 2010, 53: 36-40
- 2 Pan J L, Paul S, Jain R. A survey of the research on future Internet architectures. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 26-36
- 3 Paul S, Pan J L, Jain R. Architectures for the future networks and the next generation Internet: a survey. *Comput Commun*, 2011, 34: 2-42

- 4 Xie G G, Zhang Y J, Li Z Y, et al. A survey on future Internet architecture. *Chinese J Comput*, 2012, 35: 1109–1118 [谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述. *计算机学报*, 2012, 35: 1109–1118]
- 5 Zhang H K, Su W. Fundamental research on the architecture of new network — universal network and pervasive services. *Acta Electron Sin*, 2007, 35: 593–598 [张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究 — 体化网络与普适服务. *电子学报*, 2007, 35: 593–598]
- 6 Meng L M, Xie G G, Qiu X S, et al. Current and upcoming development in basic research of measurable, controllable and manageable IP network. *J Commun*, 2008, 29: 96–101 [孟洛明, 谢高岗, 邱雪松, 等. IP 网可测可控可管的研究现状和若干重要发展趋势. *通信学报*, 2008, 29: 96–101]
- 7 Wu Q H, Li Z Y, Zhou J E, et al. SOFIA: towards service-oriented information centric networking. *IEEE Netw*, 2014, 28: 12–18
- 8 Lan J L, Cheng D N, Hu Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture. *J Commun*, 2014, 35: 128–139 [兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究. *通信学报*, 2014, 35: 128–139]
- 9 Zhang H K, Luo H B. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks. *Acta Electron Sin*, 2013, 41: 1249–1254 [张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究. *电子学报*, 2013, 41: 1249–1254]
- 10 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content. *Commun ACM*, 2012, 55: 117–124
- 11 Zhang H K, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet. *IEEE Network*, 2016, 30: 46–51
- 12 Zhang H K, Dong P, Quan W, et al. Promoting efficient communications for high speed railway using smart collaborative networking. *IEEE Wirel Commun*, 2015, 22: 92–97
- 13 Zhang H K, Su W, Quan W. *Smart Collaborative Identifier Network: a Promising Design of Future Internet*. Berlin: Springer-Verlag, 2016
- 14 Zhang H K, Dong P, Shui Y, et al. A scalable and smart hierarchical wireless communication architecture based on network/user separation. *IEEE Wirel Commun*, 2017, 24: 18–24

Future Internet architecture: research status, hot topics, and development practice

Wei QUAN* & Hongke ZHANG*

NGIT, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

* Corresponding author. E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn, hkzhang@bjtu.edu.cn

Abstract With continuous increase in the number of its users and applications, the Internet has been gradually encountering the issues of security, mobility, scalability. Therefore, many organizations around the world are engaged in research that aims to overcome these drawbacks. We first describe the main problems faced by the Internet, review some related research, and analyze some promising technologies, such as SDN, NFV, NS, and ICN. Then, we highlight the research work on SINET, which allows to integrate a variety of advanced network technologies and adapt to different application environments dynamically. This design conforms to the development trend of the future Internet.

Keywords Internet drawbacks, future Internet, network architecture, SINET



Wei QUAN was born in 1987. He received his Ph.D. degree in communication and information system from the Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), Beijing, China, in 2014. He is currently a lecturer at the School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University (BJTU), China. He has published more than 20 papers in prestigious international journals and conferences, including IEEE Wireless Communications, IEEE Network, IEEE Communications Letters, IFIP Networking, and IEEE WCNC, and serves as a technical reviewer for some important international journals and conferences. His research interests include key technologies for future Internet, 5G network architecture, vehicular networks and Internet of energy. He is a member of IEEE and ACM.



Hongke ZHANG was born in 1957. He received his M.S. and Ph.D. degrees in electrical and communication systems from the University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), Chengdu, China, in 1988 and 1992, respectively. He is currently a full professor at the School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University (BJTU), and the director of the National Engineering Lab on Next Generation Internet Technologies, China. His research has resulted in many papers, books, patents and systems in the areas of communications and computer networks. His h-index is 24. His research interests include next generation networks and future Internet architecture. He is the Chief Scientist of National Basic Research Program of China (973 Program) and has also served on the editorial board of several international journals. He is a senior member of IEEE.