



新型网络技术发展思考

邬江兴

国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002

E-mail: chxachxa@126.com

收稿日期: 2018-03-27; 接受日期: 2018-04-23; 网络出版日期: 2018-08-03

国家自然科学基金创新研究群体项目 (批准号: 61521003)、国家高技术研究发展计划 (863) (批准号: 2015AA016102)、中国工程科技中长期发展战略研究项目 (批准号: 2016-ZCQ-04)、上海市科学技术委员会科研计划课题 (批准号: 16DZ1120503) 和河南省科技攻关计划课题 (批准号: 162102210034) 资助项目

摘要 面对互联网与经济社会深度融合发展带来的专业化服务需求, 现有互联网基础架构及由此构建的技术体系在智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等方面仍面临一系列挑战. 本文分析了新型网络技术创新的基础, 明确了新型网络的基本技术特征, 以全维可定义的开放架构为主线、以基线技术重塑为切入点, 探讨了基线技术重塑下新型网络的基础架构和核心机理, 为互联网技术创新与突破探索了可能的方法和途径.

关键词 新型网络技术, 开放架构, 全维可定义, 多样化寻址与路由, 智慧化, 广义鲁棒控制

1 引言

随着网络技术和应用的不断发展, 特别是大数据、云计算、人工智能等的出现和运用, 互联网迎来了加速裂变式的新一轮革命, 它促使社会各方面发生颠覆性变革, 并深刻改变着人类世界的空间轴、时间轴和思想维度. 互联网业已成为与国民经济和社会发展高度相关的重大信息基础设施, 对提高社会生产力、助推经济社会转型升级、创造新的就业机会等均具有深远影响, 为加快建设创新型国家, 实现“网络强国”和“智慧社会”提供了强大的基础支撑^[1]. 近年来, 随着互联网应用外延的迅速拓展, “如何充分用好网络”的问题已基本解决. 然而, 面对互联网与经济社会深度融合发展所带来的专业化服务承载需求, 互联网技术内涵的发展却未能充分支撑网络应用外延的拓展, 现有网络基础架构及由此构建的技术体系在智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等方面仍面临一系列重大挑战, 制约了其在更广更深层次上支撑经济社会发展^[2~4]. “什么样的网络更好用”成为互联网当前亟待解决的核心问题.

最近十余年来, 新型网络技术始终是全球学术界和产业界关注的焦点, 广大科技人员为此提出了各种解决思路及相应的技术和方案, 已在多种场景下初步应用并展现出强大生命力^[5~7], 特别是基于开放架构的软件定义网络 (software-defined networking, SDN)^[8,9] 和网络功能虚拟化 (network function

引用格式: 邬江兴. 新型网络技术发展思考. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1102–1111, doi: 10.1360/N112018-00062

Wu J X. Thoughts on the development of novel network technology (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1102–1111, doi: 10.1360/N112018-00062

virtualization, NFV)^[10,11] 等技术蓬勃发展, 预计在未来 5~8 年内将逐步成为信息基础设施的主流技术架构, 并进入成熟应用发展阶段, 为互联网技术的持续创新与演进消除了“壁垒”。在强大的外部需求牵引和自身技术发展的双向驱动下, 当前互联网技术体系的坚冰正在被打破。在推动互联网增量式部署和演进式发展的同时, 充分吸收和利用新思路、新方法, 对互联网技术体系进行基础性变革, 加强互联网技术架构创新, 促进技术研发由外挂式向内生性转变, 构建智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能的新型网络, 将是互联网下一步发展趋势。

对于我国互联网发展而言, 后发劣势使得我们在跟跑过程中付出了沉重的经济代价、时间代价和机会代价, 相关产业饱受缺乏核心技术自主掌握带来的发展限制。因此, 在新型网络发展的变革期, 抓住机遇谋求更深层次、更广领域的发展, 推动我国互联网技术由跟跑到领跑, 实现由“通信产业大国”到“通信技术强国”的历史性转折, 是新时代互联网科技工作者的崇高使命。

本文分析了当前网络发展面临的主要挑战, 以全维可定义的开放架构为主线, 以基线技术重塑为切入点, 阐述了新型网络应具备的基本技术特征和核心机理, 为互联网技术创新与突破探索可能的方法和途径, 供广大科技人员参考。

2 互联网发展面临的主要挑战

随着互联网与经济社会深度融合发展, 互联网+、工业 4.0 等逐渐成为国民经济命脉领域的新支柱。互联网在当前社会中扮演的角色日益增多, 使得用户对网络的专业化、个性化需求不断提升; 多元化终端类型、接入方式不断发展, 人-人、人-机、机-机、网-网通信等成为常态, 要求网络必须为海量业务提供多元、个性、智慧、高效、鲁棒等服务。

面对上述需求的演进变化, 现有互联网的技术内涵与外延发展存在严重的不充分不平衡, 无法满足泛在场景下各类型各层次用户对美好用网体验的需求, 使得当前网络对质量、安全、融合、扩展、可控、效能、移动等的支持能力低下, 在应对巨复杂用网需求时面临巨大挑战。

主要挑战之一: 封闭的网络架构和刚性的基线技术, 限制了网络多元化发展, 制约了网络专业化服务, 禁锢了网络创新技术的应用。

回顾互联网几十年来的发展历史, 其始终采用基于 IP 瘦腰模型的封闭架构以及刚性的传输协议、路由控制和转发方式等基线技术, 能力简单而薄弱, 网络功能体制单一, 对泛在的信息服务、多样化和全方位的网络业务、确保质量的通信效果、安全可信的信息交互等的支持能力已经严重不足^[12,13]。

追溯这一现象或者模式的成因可以发现, 封闭网络架构和刚性基线技术之所以成为现有网络的选择, 并非技术因素驱动, 而是市场机制作用的结果。在封闭模式下, 基线技术一旦占据主导地位就会不断强化。不可否认, 在封闭网络架构和刚性基线技术下, 网络按照简单的用网需求、有限的业务类型和单调的用网场景构建与之匹配的运行机制, 在发展初期为互联网快速普及和成熟提供了强大的支撑和有力保障。

然而, 随着互联网作为全球基础设施地位的确立, 其多元化、专业化服务需求不断提升, 以尽力而为传输和统计复用为代表的网络资源供需匹配和调度机制存在先天不足, 而重大的基础技术创新又始终无法在网络上得到实施, 使得网络“能”与“效”之间的矛盾始终存在且无法得到根本性解决。这种窘境, 使得试图靠被动的增加网络资源或技术补丁来实现网络“能”力增长, 不一定带来“效”果的增加, 网络越来越臃肿已成为不争的事实。

主要挑战之二: 互联网的多元化发展, 导致当前僵化的网络运行机制下传输控制、资源管理、配置维护等复杂性倍增, 网络效率低下, 用户体验差。

当前, 互联网已经从早期非实时业务承载为主, 发展到目前以文本、图像、语音、视频综合内容承载为基础, 并逐渐成为连接现实世界中各种生产、生活要素的基础方式, 呈现出终端类型多元化、接入方式多元化、设备形态多元化、业务场景多元化等趋势。

然而, 现有互联网的运行方式僵化, 其单一固定甚至基于人工的配置管理和调度机制等已无法满足网络多元化发展所带来的泛在用网场景需求, 导致网络传输控制、资源管理、配置维护等复杂性倍增, 网络运行维护开销巨大^[14]。同时, 现有网络中用于刻画网络功能、性能的指标和模型, 以及由此构建的匹配用户业务需求的方法, 也已无法适应泛在场景用网需求, 使得网络效率低下, 用户体验差^[15], 面临深刻变化。

如何使网络具备面向泛在用网场景需求的“无人驾驶”能力, 在结构优化、资源分配与管理、业务承载与服务质量保障、网络运行监测与故障定位恢复等方面逐渐摆脱对人力或僵化运行机制的一味依赖, 充分吸收和利用人工智能等技术的发展成果, 降低网络传输控制、资源管理和配置维护的成本, 同时使得网络具备自我发展能力, 改善复杂网络环境下由人为认知局限造成的网络运营低效等不利局面, 引导和升级传统简单粗放的网络资源管理和运营模式, 在新型网络技术发展中必须着力考虑。

主要挑战之三: 网络节点或链路随机性失效、网元系统包含漏洞后门等不确定扰动事件频发, 使得互联网的广义鲁棒性问题日趋突出。

网络规模快速膨胀及各种网络要素的巨复杂特性, 使得互联网运行中经常会受到不确定性的干扰或者破坏, 从而导致其性能降低甚至功能丧失, 无法满足用户服务需求^[16]。

事实上, 互联网目前尚缺乏为其软硬件系统提供抑制包括漏洞后门等“暗功能”在内的广义不确定扰动能力, 所以原本属于目标对象或网络元素设计和制造过程中的质量控制问题, 就万般无奈地“溢出”成为网络空间最主要的安全挑战, 互联网的“潘多拉魔盒”由此打开。生产厂商或企业“不承诺软硬件产品安全质量”或“不对产品安全质量引起的后果承担任何责任”的行为, 都可以归结为网络广义鲁棒性问题所致。

因此, 在网络的可靠性、可信性均无法保障的生态环境中, 恢复产品质量神圣承诺和商业信誉, 治理被严重毒化污染的网络空间环境, 将“魔鬼”关回到潘多拉盒中, 研究使网络既能抑制节点或链路失效等不确定失效扰动, 也能防范系统后门、漏洞等不确定性威胁扰动影响的广义鲁棒控制技术, 保持满意的服务品质, 增强网络对各种破坏意图的抵抗能力, 是新型网络面临的另一重要挑战。

3 新型网络技术创新的现实基础

应该指出的是, 学术界和产业界对新型网络及其支撑技术发展已关注多年, 国内外相关研究和实践成果颇丰, 这为打破网络发展困境、创新新型网络技术提供了良好的现实基础。其中, 软件定义网络 (SDN)/网络功能虚拟化 (NFV) 等为新型网络技术创新提供了开放环境基础, 多样化寻址、人工智能、广义鲁棒控制等技术为新型网络技术创新提供了核心要素基础, 而“硅红利”和“光红利”的充分释放为新型网络技术创新提供了实现基础。

3.1 SDN/NFV 等为新型网络技术创新提供了开放环境基础

近年来, 以 SDN/NFV 为代表的开放可编程网络及相关技术蓬勃发展, 其通过转发与控制分离机制对计算、存储、网络资源进行灵活调度和管理, 使得网络中链路、路由、流量等按需调度, 并基于功能可重构、可编程等实现了网络开放、可扩展和自演化能力, 从而提升了网络传输效率并优化资源配

置等^[17,18]. 其中, 开放可编程是对网络整体功能和行为的高度抽象以及软件编程的自定义, 其核心思想是通过对网络节点提供开放可编程接口, 利用编程语言向网络设备发送强大的编程指令, 实现对网络功能和行为的按需管控和新业务的快速部署^[19]. 网络功能虚拟化 (NFV) 则强调通过将这些功能部署到虚拟化的网络资源上, 使得网络在灵活性、动态资源扩展、能量效率等方面更具优势^[20]. 同时, 网络功能虚拟化也支持虚拟化资源与物理资源混合的场景, 具有广阔的应用前景. SDN/NFV 等为开放架构和可编程技术创造了网络技术创新和试验环境, 使得新型网络具备了由封闭架构到开放架构彻底转变的技术和环境基础.

相关研究方面, 国家已经支持了“新一代互联网体系架构与协议研究”、“面向服务的未来互联网体系结构与机制研究”、“可重构信息通信基础网络体系研究”、“软件定义网络 (SDN) 关键技术研发与示范”等研究工作, 并启动国家重大科技基础设施项目“未来网络试验设施”, 从体系架构、关键技术、运行机理和组网试验等层面对开放网络架构技术进行了探索. 其中, 我国独创的可重构网络技术^[21], 明确提出了打破传统网络技术“封闭”和“刚性”束缚、创造开放架构的未来网络体系, 释放技术创新的活力, 全面支撑新型网络技术的创新.

工程实践方面, 从大型运营商到数据中心和各类专用网络, 都已经开始规模化应用 SDN/NFV 来提升自身的网络能力^[22]. 在国内外各大运营商制定的未来发展战略中, 均明确将 SDN/NFV 作为其未来几年网络建设的主要技术基础. 此外, 我国已开通了覆盖十六个城市的基于新一代网络体系架构创新试验设施, 在软件定义路由交换设备、信息资源智能调度系统等方面取得了突破, 形成了一批具备自主知识产权的成果.

3.2 多项关键技术的突破为新型网络技术创新提供了核心要素基础

首先, 软件定义一切的理念从理论走向实践. 以软件定义转发 (SDF)^[22]、软件定义互连 (SDI)^[23]、软件定义硬件 (SDH)^[24]、软件定义协议 (SDP)^[25]、软件定义芯片 (SDC)^[26] 等为代表的软件定义技术蓬勃发展, 可实现对基础网络的拓扑、协议、软/硬件、接口等进行全维度定义, 从而为多元化、个性化应用提供了精细化、可定义的网络组件和服务. 软件定义思想在互联网领域内的全链条应用和实践, 支持为不同类型的通信主体构建满足其个性化需求的服务承载网络, 支持现有典型协议以及各种新型协议的快速部署, 有望提高网络资源利用率, 降低维护成本, 并带来网络架构演进、设备形态变化和组网运营模式等变革.

其次, 多样化寻址和路由技术创新酝酿重大突破. 现实世界呈现出以邮政编码、门牌号为基础的传统寻址模式和“以服务内容搜索为中心”、“以空间坐标定位服务为中心”等新型寻址模式多样化发展的局面, 并展现出高效多样化服务的强大生命力. 与物理世界强关联的网络空间也已呈现出与之匹配的多样化寻址与路由技术创新. 尽管在未来相当长一段时间内以 IPv4/v6 为基础的寻址和路由方式仍将持续发挥重要作用, 但近年来以内容为中心的寻址路由方式^[27,28]、以空间坐标位置为中心的寻址路由方式^[29]、以标识分离为中心的寻址路由方式^[30] 等技术发展迅速, 已在现实网络中初步应用并取得良好效果.

第三, 面向泛在用网场景需求的网络“无人驾驶”技术研究活跃. 近年来, 网络大数据分析、人工智能技术等蓬勃发展, 在此基础上建立网络自我驱动的智慧化运行机制, 成为学术和产业界探索的重点. Clark 等^[31] 提出网络“知识平面”概念, 建议基于人工智能与认知系统来实现网络的自配置、自适应、自修复. Mestres 等^[32] 提出了知识定义网络的概念, 动态监测网络状态并基于机器学习算法进行分析决策, 进而优化网络配置和性能. 国内外主流设备制造商和互联网企业如华为、思科、中兴、谷歌、阿里等也纷纷着力探索复杂网络的智慧运营方法并取得了初步效果.

最后, 拟态构造技术为解决网络广义鲁棒控制问题提供了切实可行的途径^[33]. 网络广义鲁棒控制问题本质上可以对应为面对漏洞后门攻击时的静态性、确定性和相似性之构造缺陷问题. 利用网络服务功能与视在结构的不确定性关系, 在信息系统或处理装置中运用功能等价动态变结构技术, 无疑可以扰乱或瓦解基于目标对象漏洞后门攻击链的稳定性, 以视在的不确定目标场景应对网络空间安全威胁. 基于上述认知, 我国科学家和科技工作者创新性地提出了拟态构造技术并已在文件存储、路由交换、域名服务等进行设备开发与试点应用, 为在信息系统软硬件供应链可信性不能确保的全球化生态环境下, 运用创新的系统构造技术解决网络广义鲁棒控制问题开辟了一条新途径.

3.3 “硅红利”和“光红利”的充分释放为新型网络技术创新提供了实现基础

芯片与器件水平是网络技术赖以发展的物质基础之一. 近年来, “硅红利”和“光红利”持续释放, 不断提升网络核心元器件水平, 推动新型网络基础原理创新和核心设备系统研制, 为新型网络技术创新提供了实现基础.

在“硅红利”方面, 随着网络核心元器件的工艺水平不断提升, 网络核心设备的计算、存储和传输能力大幅提高, 不仅为网络新技术的部署和实施提供了重要支撑, 而且使得新型网络技术的创新逻辑得以拓展. 在此基础上, 网络演进已经不再局限于“传输”能力的单边提升, 而是全面发展为基于“传输、计算、存储”一体化的融合提升模式. 通过存贮、计算与传输能力间的动态转换和组合应用, 显著提升了网络服务能力.

在“光红利”方面, 光波长处理、多芯光缆等方面的技术进步, 推动了光纤和光器件不断刷新更高性能纪录, 使得新型网络技术能够具备更多的可用带宽, 通过更多的带宽资源总量达到更强的网络服务能力. 这就使得新型网络技术的研究能够聚焦于网络核心机理和核心逻辑, 从而能够在更深层次和更基础的环节来解决网络发展面临的核心问题.

4 新型网络的基本技术特征

基于上述认知, 我们认为新型网络应该具备全维可定义、多样化寻址路由、智慧化和广义鲁棒性等基本技术特征, 并以这些特征来分别确定新型网络的“开放基因”、“功能基因”、“效能基因”和“鲁棒基因”, 以基因特有的内生作用为新型网络发展提供持续演进动力.

4.1 以全维可定义确定新型网络的“开放基因”

随着网络业务形态不断丰富, 业务对网络的需求越来越多样和多变, 而传统网络架构的刚性和封闭特性, 导致其服务能力是有限的且确定的, 这就直接导致了业务需求与网络固有能力之间的差距日益扩大, 难以甚至不能支持不断演进发展的网络业务需求.

新型网络的首要技术特征就是打破传统网络的刚性、封闭架构, 能够对开放架构下基础网络的软/硬件、协议、接口、芯片等进行全维可定义, 从而使得网络的运行机理不再受制于单一功能或技术, 使得网络具备多维资源的柔性组织和适配能力, 在服务灵活性和业务适应性上满足多样化业务需求, 并自然适应未来业务的复杂不确定演进.

因此, 新型网络将通过全维可定义来确定其“开放基因”, 在全维可定义的基础上支撑网络架构“开放”, 改变当前网络固化的运行模式, 由其作为“网络功能构件市场”机制的提供者, 允许多样化应用动态装配、构建与之匹配的定制化服务构件链, 动态部署个性化应用, 实现全网业务的灵动适配.

在开放网络架构下实施全维可定义, 新型网络将不再存在基线技术垄断的风险, 内在的开放性使得各个层次的创新都能够有效开展. 网络的功能和工作机理将不再受制于具体的协议, 其服务能力不再依赖节点的初始植入设计, 其服务能力空间将超越已知协议和机制的限制, 从而实现由已知协议定义的网络到需求驱动的网络形态和服务能力转变, 充分满足新型网络不断演进的业务需求.

4.2 以多样化寻址路由确定新型网络的“功能基因”

当前, IP 是传统网络的唯一寻址方式, 无法满足多样化、多元化、专业化的应用需求. “千军万马过 IP 独木桥” 的同质化格局, 使网络世界因为失去多样化的内在活力而演进缓慢.

事实上, 自然界物种多样性为构建和谐多元化的网络空间共同体提供科学的理论依据. 自然界的多元化物种之间因为其相互补充、相互制约、相互平衡而构成一个和谐统一的发展格局. 如果没有竞争性变异的累积和推陈出新的延续, 生物界会因为同质化而逐渐走向凋亡.

因此, 新型网络应以多样化寻址路由重新确定其“功能基因”, 在基础网络功能上体现出多元融合发展, 并由此构建出基于基因信息表达的体系化网络功能生成和按需演化机制. 同时, 基于多样化标识的寻址路由技术也将为新型网络基线技术创新提供功能基础环境, 为多元化业务需求提供资源深度融合使用支撑. 通过多样化标识寻址空间的协同技术创新和优势互补, 以先天内生方式解决现有网络存在的诸多弊端, 有效提升网络服务能力、安全性、移动性、资源利用率等.

4.3 以网络智慧化确定新型网络的“效能基因”

网络智慧化的目标是, 在全维可定义和多样化寻址路由的基础上, 以网络传输效能、节点运行效能、业务承载效能和服务提供效能等为约束, 建立“感知 – 决策 – 适配” 一体的自我驱动运行机制, 实现网络资源管理和传输控制的智能适配以及网络运维的自动化, 使得用网便捷且网络能够在无感的情况下随着环境和用户需求的改变而智能调节.

将网络智慧化确定为新型网络的“效能基因”, 使得“用网过程” 和“用网体验” 不再是用户所关注的问题, 将用户的关注点归结为“用网目的” 这一简单二元问题. 此时, 网络可在海量的用户、网元和业务之间进行适配协调, 根据用户用网目的直接决定网络服务的提供方式, 并智能动态地适应用户需求变化, 从根本上释放网络潜力.

网络智慧化将充分借鉴人类社会、生物机体内部运行以及生物群体智慧等领域的研究成果, 拓展人类智慧在网络构建和运行中的应用深度和广度, 提供“源于现实世界启迪, 创造高于现实世界” 的体验. 具有智慧化特征的网络, 在网络构建时能够从近似于人类自然语言描述的需求出发, 自动推演出合适的网络资源组成、节点协作模式、运行控制模式等, 并且能够根据实际运行效果进行自我调整和优化; 同时, 在满足用户和业务需求方面, 具有智慧化特征的网络也能够通过自身积累“经验”, 基于智能感知、大数据和人工智能等技术, 促使网络在智能满足现实需求方面不断优化服务效果和服务性能.

4.4 以广义鲁棒控制确定新型网络的“鲁棒基因”

新型网络必须具备广义鲁棒控制构造的“鲁棒基因”, 不仅能够有效抑制目标对象内部传统的不确定扰动影响, 也能够基于漏洞后门等人为扰动下维持系统服务功能和性能的鲁棒性, 从而在很大程度上抵消网络元素广义鲁棒控制功能缺位对互联网服务品质造成的负面影响.

面对新型网络的广义鲁棒控制需求, 仅仅使攻击效果不确定或者只能在不同程度上瓦解不确定扰动因素并非防御者的终极诉求. 理想目标是, 无论对已知风险还是未知威胁导致的确定或不确定扰动效果, 都能被某种构造或者机制变换为一种概率可控的可靠性问题, 以便借助成熟的可靠性理论和方法统一解决.

因此, 为网络植入广义鲁棒控制基因, 在网络与平台设计中导入鲁棒控制机制, 设计完整的网络鲁棒控制架构, 使网络既能抑制节点或链路失效等不确定失效扰动, 也能防范系统后门、漏洞等不确定性威胁扰动影响, 实现“网元鲁棒构造、网络鲁棒控制、服务鲁棒提供”, 是新型网络实现稳态服务提供的必然要求.

5 基线技术重塑下的新型网络核心机理

在新型网络体制下, 我们认为基线技术将不再是传输协议、转发模式和路由控制这一传统封闭环境下的刚性桎梏, 而是在全维可定义的开放网络架构基础上重塑为多样化寻址与路由、网络智能化和广义鲁棒控制. 下面, 将分别从基础运行环境、多元功能组成、服务提供方式和运行保障机制 4 个方面讨论基线技术重塑下的新型网络核心机理.

5.1 全维可定义的开放网络架构

以 SDH、SDI、SDF、SDC 等为代表的全维可定义技术, 是支撑开放网络技术持续创新的基础. 在全维可定义的开放架构下, 新型网络以可定义的构件和网络柔性化组织为基础, 建立网络连接、硬件、协议、转发等全维可定义的基础结构, 实现基础连接、节点、网络等层面全链条可定义.

首先, 为了保证现有业务和网络设施能够适应网络的演进, 开放架构下的全维可定义构件及其运行平台必须具有良好的稳定性, 即构件能够在保持新的网络协议或应用增量部署的同时也能够保证原有应用的正常运行; 其次, 为了保证网络能够在多维评价指标上呈现良好的变化以满足业务的变化以及新型应用的部署, 构件必须具有可变化的内在结构, 也就是说包处理的方式以及网络协议的运行方式可以动态改变; 最后, 在构件结构可变的基础上, 构件要能够以某种“柔性”的方式对其结构进行调整, 进一步地, 柔性是构件针对应用要求对其内在结构、资源做出的隐性调整, 以实现网络服务效果对应用需求的动态、紧密跟随.

5.2 多样化寻址与路由

多元化的网络应用需要多样化的寻址与路由方式, 以及高效灵活编址与路由的融合发展. 具体而言, 我们认为新型网络的多样化寻址与路由机制应包括但不局限于如下典型方式.

- 以 IPv4/v6 为基础的寻址和路由. 该方式采用等级地址模式、地址自动配置、源认证等技术, 具有较强的灵活性和快速处理能力, 在新型网络中仍将持续发挥重要作用.
- 以内容标识为基础的寻址和路由. 该方式将网络通信模式从关注“where”转变为关注“what”, 将网络中的一切数据内容都看作是可以传输的信息, 实现了直接以内容互联的方式而非主机互联.
- 以身份标识为基础的寻址和路由. 该方式通过身份与位置分离、资源与位置分离、接入与核心分离, 综合有效解决安全性、移动性、可扩展性、用户体验等问题.
- 以空间坐标位置标识为中心的寻址和路由. 该方式基于地球剖分网格进行网络位置编码, 可实现网络空间与现实空间位置的直接映射, 为提升网络应用效能提供支撑.

5.3 “感知 – 决策 – 适配” 一体的智慧化传输与管理

新型网络通过引入群体智能、人工智能等技术, 建立“感知 – 决策 – 适配” 一体的网络智慧化传输与管理机制, 采用网络资源智能协调控制技术、智能传输优化技术和业务智能适配的服务承载技术等, 实现面向用户体验的大规模网络智慧化管理与传输。

网络的“感知 – 决策 – 适配” 一体的网络智慧化传输与管理包括: (1) 感知: 通过泛在互联、可定义感知等技术, 动态、实时感知网络业务与网络资源分布, 并基于高层感知语义的统一描述模型生成全网视图, 支持网络感知对象、感知动作、关联规则和功能分配的可定义; (2) 决策: 针对网络状态复杂、流量行为多变、业务模型不确定等特点, 进行复杂不确定业务与资源间的拟合决策生成, 实时决策网络中的资源管理策略、运维控制规则等; (3) 适配: 针对互联网复杂不确定情况下网络结构对业务需求的适应性问题的, 运用 SDN、NFV、可重构等新兴技术, 进行路由调度、功能重构、资源配置、服务承载等自适应调节, 增强网络的业务适应性和可扩展性, 支持跨域资源的动态协同分配和深度融合利用, 使其具有柔性组织能力和持续演进能力。

5.4 内生性鲁棒控制机制

在不确定性威胁日益严重的情况下, 为实现网元鲁棒构造、网络鲁棒控制、服务鲁棒提供, 新型网络需构建“高可靠、高可信、高可用” 三位一体的内生性鲁棒控制机制。

源于生物界启迪的拟态构造技术, 通过在网络中引入动态异构冗余特性, 采用负反馈机制应对系统中的不确定失效扰动。基于拟态的内生性鲁棒控制机制具有如下特性: (1) 将针对目标对象执行体漏洞后门的、人为的、确定性的不确定扰动, 转变为系统层面扰动效果不确定的事件; (2) 将系统效果不确定的扰动事件变换为概率可控的可靠性问题; (3) 基于拟态裁决的策略调度和多维动态重构负反馈机制, 能够呈现出扰动发起者视角下的“测不准” 效应; (4) 借助“相对正确” 公理的逻辑表达机制, 可以在不依赖扰动信息或行为特征情况下感知不确定扰动; (5) 将非传统扰动因素变换或归一化为经典的可靠性和鲁棒性问题并处理之。

6 总结

践行互联网科技工作者的时代使命, 以开放架构下 SDN/NFV 技术为基础, 以基线技术的重塑为支撑, 创建增量部署的演进发展模式, 打造“中国智造” 的新型网络, 推动我国通信网络技术由“跟跑” 到“领跑”, 实现由“通信产业大国” 到“通信技术强国” 的转变是新型网络技术创新的基本逻辑。本文从网络发展面临的主要挑战出发, 提出了新型网络应具备的基本技术特征, 对新型网络的核心机理进行了探讨, 供广大网络科技工作者参考。

致谢 本文在撰写过程中得到了项目组兰巨龙教授、伊鹏研究员、胡宇翔副研究员、张校辉博士、王鹏博士等同事的大力帮助和支持, 他们为本文提供了诸多十分有益的思路; 同时, 感谢刘韵洁院士、吴建平院士、尤肖虎教授、张宏科教授、程承旗教授、魏少军教授等为本文提供的宝贵建议。

参考文献

- 1 Wu J X, Lan J L, Cheng D N, et al. Novel Network Architecture. Beijing: Post Telecom Press, 2014 [鄢江兴, 兰巨龙, 程东年, 等. 新型网络体系结构. 北京: 人民邮电出版社, 2014]

- 2 Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: clean-slate versus evolutionary research. *Commun ACM*, 2010, 53: 36–40
- 3 Wu J P, Li X, Liu Y. Research status and development trends of next-generation Internet architecture. *ZTE Tech J*, 2011, 17: 10–14 [吴建平, 李星, 刘莹. 下一代互联网体系结构研究现状和发展趋势. *中兴通讯技术*, 2011, 17: 10–14]
- 4 Quan W, Zhang H K. Future Internet architecture: research status, hot topics, and development practice. *Sin Chin Inform*, 2017, 47: 804–810 [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]
- 5 Pan J, Paul S, Jain R. A survey of the research on future internet architectures. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 26–36
- 6 Huang T, Liu J, Huo R, et al. Survey of research on future network architectures. *J Commun*, 2014, 35: 184–197 [黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述. *通信学报*, 2014, 35: 184–197]
- 7 Li L M. Future network architectures. *ZTE Tech J*, 2013, 19: 39–42 [李乐民. 未来网络的体系结构研究. *中兴通讯技术*, 2013, 19: 39–42]
- 8 McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2008, 38: 69–74
- 9 Hakiri A, Gokhale A, Berthou P, et al. Software-defined networking: challenges and research opportunities for future Internet. *Comput Netw*, 2014, 75: 453–471
- 10 Han B, Gopalakrishnan V, Ji L S, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 90–97
- 11 Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, et al. Management and orchestration challenges in network functions virtualization. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 98–105
- 12 Wang B Q, Wu J X. Development trends and associated countermeasures analysis for NGN. *J Inf Eng Univ*, 2009, 10: 1–6 [汪斌强, 邬江兴. 下一代互联网的发展趋势及相应对策分析. *信息工程大学学报*, 2009, 10: 1–6]
- 13 Balasubramaniam S, Leibnitz K, Lio P, et al. Biological principles for future internet architecture design. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 44–52
- 14 Ousterhout J K, Cherenon A R, Douglass F, et al. The sprite network operating system. *Computer*, 2002, 21: 23–36
- 15 Shen Q G, Yu Z W, Gong J. Review of next generation network architecture. *J Commun*, 2010, 31: 3–17 [沈庆国, 于振伟, 龚晶. 网络体系结构的研究现状和发展动向. *通信学报*, 2010, 31: 3–17]
- 16 Ma M J, Sun F G, Zhai L G, et al. Security challenges facing our country and countermeasure recommendations under new network security threats. *Telecommun Sci*, 2014, 30: 8–12 [马明杰, 孙奉刚, 翟立东, 等. 网络安全新威胁下我国面临的安全挑战和对策建议. *电信科学*, 2014, 30: 8–12]
- 17 Zhao H L, Feng M, Shi F. SDN, key trends of the future network evolution. *Telecommun Sci*, 2012, 28: 1–5 [赵慧玲, 冯明, 史凡. SDN——未来网络演进的重要趋势. *电信科学*, 2012, 28: 1–5]
- 18 Lan J L, Mo H, Hu Y X. SDN architecture: research and practice. *ZTE Tech J*, 2013, 19: 11–15 [兰巨龙, 莫涵, 胡宇翔. 软件定义网络架构研究与实践. *中兴通讯技术*, 2013, 19: 11–15]
- 19 Wood T, Ramakrishnan K K, Hwang J, et al. Toward a software-based network: integrating software defined networking and network function virtualization. *IEEE Netw*, 2015, 29: 36–41
- 20 Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges. *IEEE Commun Surv Tut*, 2017, 18: 236–262
- 21 Lan J L, Cheng D N, Hu Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture. *J Commun*, 2014, 1: 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, 1: 128–139]
- 22 Li S, Hu D, Fang W, et al. Protocol oblivious forwarding (POF): software-defined networking with enhanced programmability. *IEEE Netw*, 2017, 31: 58–66
- 23 Wu Z, Lu K, Wang X, et al. Alleviating network congestion for HPC clusters with fat-tree interconnection leveraging software-defined networking. In: *Proceedings of International Conference on Systems & Informatics*, Hangzhou, 2017. 808–813
- 24 Wang C, Li X, Chen Y, et al. Service-oriented architecture on FPGA-based MPSoC. *IEEE Trans Parall Distrib Syst*, 2017, 28: 2993–3006
- 25 Wen R H, Feng G, Tan W, et al. Protocol stack mapping of software defined protocol for next generation mobile networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016. 1–6

- 26 Liu Y, Wei S J. What is still missing in China for the development of artificial intelligence chips? *Chin Integr Circ*, 2017, 26: 20–23 [刘焱, 魏少军. 发展人工智能芯片中国还缺什么. *中国集成电路*, 2017, 26: 20–23]
- 27 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content. *Commun ACM*, 2012, 55: 117–124
- 28 Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking. *IEEE Commun Mag*, 2012, 50: 26–36
- 29 Dong F, Cheng C, Guo S. Design and research on GeoIP. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Supported Cooperation Work in Design*, Fudan, 2010. 13–17
- 30 Zhang H, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: A collaborative architecture for the future Internet. *IEEE Netw*, 2016, 30: 46–51
- 31 Clark D D, Partridge C, Ramming J C, et al. A knowledge plane for the Internet. In: *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, Karlsruhe, 2003. 3–10
- 32 Mestres A, Rodrigueznatal A, Carner J, et al. Knowledge-defined networking. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2016, 47: 2–10
- 33 Wu J X. *Introduction to Cyberspace Mimic Defense*. Beijing: Science Press, 2017 [邬江兴. 网络空间拟态防御导论. 北京: 科学出版社, 2017]

Thoughts on the development of novel network technology

Jiangxing WU

National Digital Switching System Engineering and Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China

E-mail: chxachxa@126.com

Abstract The deep integration of the Internet and the economic society has resulted in the demand for professionalized service capacity, while the existing Internet infrastructure with its corresponding technological system is still encountering a series of challenges such as intelligence, diversification, personalization, robustness, and efficiency. In this paper, we first analyze the actual foundation of innovations and specify the basic technical features of a novel network. Subsequently, we propose a full-dimension definable open architecture as the primary line, and use the reshape of baseline technologies as the starting point to discuss the core operation mechanisms of the novel network based on the reshaped baseline technologies. Briefly, we present a novel perspective to explore the possible methods for the innovations and breakthroughs of Internet technology.

Keywords novel Internet technology, open architecture, full-dimensional definability, diversified addressing and routing, intelligence, general robust control



Jiangxing WU is a director and professor of the China National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center (NDSC). He has led research on a series of core devices in the field of information technology, and has led the construction and design of several national key projects. His research interests include the next-generation information network theory and technology, and mimic defense technology. He is the principal investigator and chief designer of mimic defense theory and technology.