



# 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构

王飞跃<sup>1,2</sup>, 杨柳青<sup>1\*</sup>, 胡晓娅<sup>1,3</sup>, 程翔<sup>4,5</sup>, 韩双双<sup>1,5</sup>, 杨坚<sup>1,5</sup>

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190

2. 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心, 长沙 410073

3. 华中科技大学自动化学院, 武汉 430074

4. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

5. 青岛智能产业技术研究院, 青岛 266000

\* 通信作者. E-mail: ylq.cas@gmail.com

收稿日期: 2016-05-01; 接受日期: 2016-10-13; 网络出版日期: 2017-07-10

国家自然科学基金(批准号: 71232006, 61501461, 61233001, 61471177, 61622101, 61571020) 和开放课题基于平行系统理论的人工网络建模方法研究(批准号: 20150109) 资助项目

**摘要** 现有网络设备支持的协议体系庞大, 导致网络系统高度复杂, 这不仅限制了网络技术的发展, 也无法满足当前云计算、大数据和服务器虚拟化等应用需求. 社会经济的驱动、信息通信技术的发展、硬件成本的降低以及开放资源的兴起, 不仅使得网络系统向高度动态及灵活的方向发展, 而且也意味着新的网络服务商进入信息技术市场的门槛降低, 新兴的商业模式及合作竞争模式即将形成. 然而, 现实各类网络系统变得越来越复杂, 相应的工程复杂性或社会复杂性越来越高, 以及网络系统的多领域、动态性和不可预测性等特性, 使得网络系统成为一个巨大的复杂系统, 很难对改善网络问题的方案事先进行较为全面和准确的评估和修正. 为此, 将平行系统理论引入到网络系统. 平行网络(parallel networks)作为一种最新网络架构, 通过人工网络与实际网络的实时信息传递及相互优化, 以及对网络系统控制面、转发面和应用层功能进行重新定义抽象, 使得网络管理软件可编程, 实现对不同层次需求、不同服务内涵的网络进行实时的决策指导及行为优化, 从而满足用户不断变化的网络服务需求.

**关键词** 平行网络, 人工网络, 计算实验, 平行执行, SDN(软件定义网络)

## 1 引言

互联网自其诞生到现在已发展了几十年, 随着用户数量的增加、网络规模的扩大以及业务的创新, 原有的网络架构已经无法满足现有及将来网络发展的需要. 以基站为例, 现有基站的实际利用率很低, 网络的平均负载一般来说大大低于忙时负载, 而且不同基站之间不能共享处理能力, 很难提高频谱效

**引用格式:** 王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 等. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 811-831, doi: 10.1360/N112016-00047  
Wang F Y, Yang L Q, Hu X Y, et al. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 811-831, doi: 10.1360/N112016-00047

率. 为了满足日益增长的用户需求, 目前一般都采用扩建基站的方式解决这一问题, 而数量巨大的基站意味着高额的建设投资、站址配套、站址租赁以及维护费用, 建设更多的基站意味着更多的资本开支和运营开支, 限制了实际发展. 同时, 运营商各个工作平台互不兼容也将导致在网络扩容或升级方面的困难.

当前网络架构中, 数据正在从单薄到丰富, 使用要求从静态变为动态, 连接从固定转向移动, 这些变化都反映了新型网络结构的必要性. 与此同时, 对廉价成本及按需交付新服务的期望等新型服务需求, 更加推动了新的网络架构的发展.

互联网对于加快国民经济发展、推动科学技术进步和加速社会服务信息化进程的不可替代作用, 引起了我国政府的高度重视. 在十三五信息规划中, 网络安全、智慧城市和云计算等新一代信息技术是重要组成部分, 它们将大力支撑政府公共服务能力提升、网络空间净化、产业转型升级和新型城市化建设, 强化网络安全, 推进我国由网络大国向网络强国迈进.

网络世界的每一次重大改变都需要大量时间, 虽然大众对于标准和新技术的接受能力在提高, 但是新技术的普及仍需要花费超过十年时间. 企业及部门在发展过程中需要不断缩减预算, 以及员工需要自动化的 IT 基础设施来简化操作流程的需求, 都促使当前网络世界的声音主要集中在网络软件化(或 IT 化)上. 网络软件化成为网络发展的必然趋势. 同时, “以人为本”、“服务无处不在”及“体验至上”成为理想与现实的双重选择, 是网络系统取得成功的关键.

网络软件化推动了 SDN (software-defined networking) [1~5] 技术的发展. SDN 采用控制与转发分离的思想, 使底层交换机仅负责数据的转发, 而将路由由算法等控制功能抽离出来形成一个控制中心, 从而轻松实现网络系统的功能修改、调整、扩展和性能提升, 满足对网络多变性、可靠性、稳定性和扩展性需求. 然而, 这一技术并不能解决复杂网络系统的动态控制和优化问题. 例如, 控制中心的控制器如何实现对整个复杂网络的管理与控制. 越来越多的网络功能意味着网络系统的巨大复杂性, 而对于复杂系统的管理和控制最有效的方式是引入平行系统 [6~8]. 因此, 结合平行系统理论, 本文提出一种新颖的平行网络系统 [9], 通过建立相应的人工网络系统, 开展相关计算实验, 对网络进行全面、准确和及时的评估, 从而实现对复杂网络的管理控制和调度以及网络性能的提升和优化, 满足人们对网络的需求.

## 2 网络架构的发展

### 2.1 网络系统现状

用户对于通信带宽的需求永无止境 [10~13]. 以蜂窝网络的发展为例, 第一二代蜂窝网络系统主要是语音和数据业务, 移动宽带业务的需求导致了第三四代蜂窝网络系统的出现, 然而这些技术出现后很快就不能满足实际需求. 当前用户对于网络应用有以下特点: 首先, 上网流量增长巨大; 其次, 连接用户数大幅提升; 最后, 多样化的应用和服务要求, 即传输速率的提升将会衍生各种应用, 如网上金融、远程教学、移动医疗和智能交通等基本业务将更加移动化. 同时, 物联网的发展亦会带来人机混合通信业务量的增加. 另一个挑战则是继续扩大的城市化. 上述趋势让我们看到百亿设备连接、史无前例的多样化的需求和应用场景. 基础网络演进正沿着移动化、智能化/虚拟化的方向发展. 移动化成为运营商接入网络层面的主导方向. 移动通信技术从传统电信运营商解决人与人之间的沟通联系, 扩展到人与物、物与物的信息交互. 移动智能终端、云应用和物联网等将催生移动数据流量持续爆炸式增长, 推动未来 5G 技术向着实现 1000 倍系统容量和 10 G 接入速率、“500 亿海量接入”和大量新的应用

场景方向发展。

移动通信网是一个不断变化的网络,网络结构、无线环境、用户分布和使用行为都是不断变化的。同时,网络规模的扩张、网络覆盖规划规模的复杂化、网络话务模型和业务模型的改变,都会导致网络当前的性能和运行情况偏离最初的设计要求。只有解决好网络出现的各种问题,优化网络资源配置,改善网络的运行环境,提高网络的运行质量,才能使网络运行在最佳状态。

随着信息化逐渐深入各个行业,企业的 IT 需求将持续上升,行业细分领域分化,云计算市场规模的不断扩大必然带来相关虚拟化、大数据等技术的迸发。云计算作为 IT 主潮流,将从国家战略、企业目标发展为实实在在进入经济、社会、工作和生活的方方面面,从云数据中心、企业云平台、政府公共服务云,到电信云、金融云、医疗云以及各个互联网公司的云服务,再延伸到云端存储、智能终端云服务。越来越多的企业通过大规模部署云计算推动战略性变革,云计算加速了产业优化升级,借助互联网、云计算和大数据技术,实现更精准的决策和更深入的协作,以占据企业核心竞争优势。

近年来,“云”已经成为网络与分布式系统发展的趋势,云计算服务场景下,无论用户采用何种终端、何种接入方式或者身在何处,都应该能够获得云计算相关服务,而对服务源以及网络变化无任何感知。因此,网络覆盖范围、接入手段、带宽供给能力、自动调配水平和网络质量等因素对云计算服务的提供至关重要。同时,随着网络用户数的不断增大,网络终端设备种类的日益增多,终端设备的处理能力越来越强,云的概念正在逐渐扩散到终端用户设备,例如移动终端,即“雾”网的概念。

综上所述,如何充分挖掘云网和雾网各自的优势成为未来网络发展面临的必然问题。在网络需求方面,将灵活、高效、支持多样业务、实现网络及服务作为设计目标;在技术方面,软件定义网络、虚拟计算等成为可能的基础技术,核心网与接入网融合、移动性管理、策略管理和网络功能重组等成为进一步研究的关键问题。另外,如何完善对现有网络资源的管理与优化,以及对未来网络系统的行为决策指导与预测,也是网络发展的必然趋势。

## 2.2 当前网络架构及支撑技术

当前网络架构是基于云计算的一种新兴的共享基础架构,它可以将巨大的系统池连接在一起以提供各种基于互联网的 IT 服务,包括 CRM 客户关系管理系统、ERP 企业资源管理系统、在线市场营销工具和供应流程管理等,同时还可以延伸到软件开发、IT 基础设施等技术层面的服务。基于云计算的共享基础架构提供了一种全新的低成本替代方案,在保证服务质量的前提下,可以为用户提供低成本的数据中心扩展能力、IT 基础设施、软件以及各种新型应用等。

基于云计算的网络架构主要分为 3 层,即基础设施即服务 (IaaS, infrastructure as a service)、平台即服务 (PaaS, platform as a service) 和软件即服务 (SaaS, software as a service),如图 1 所示。除此之外,还有最近兴起的数据即服务 (DaaS, data as a service)。尽管如此,但在实际中,这几个层级之间的界限也并不明显,之间存在很多交叉,其最终目的都是为了解决应用的问题,都是为了业务而服务,为用户降低 IT 基础设施成本、充分发挥 IT 资源规模经济效益和提供强大的扩展功能。

SDN 及 NFV (network function virtualization) 为解决当前网络架构中的技术难题提供了可行的解决方案。基于 SDN 构建云计算承载网络,能够解决云 IDC 网络与业务,计算和存储新技术的适配问题,并为适配新型流量模型提供架构上的支持。SDN 是适应云计算在计算虚拟化后对网络虚拟化的需求而发展起来的,反映了 ICT (information communication technology) 产业整体向软件化演进的趋势。其核心思想是通过解耦网络设备的软硬件,开放用户对网络的编程能力,实现业务与网络的解耦。SDN 使得网络变为可池化的资源并能作为服务提供出去,充分释放了网络的灵活性、开放性和创新性,成为基于云计算新型网络架构中的重要支撑技术。

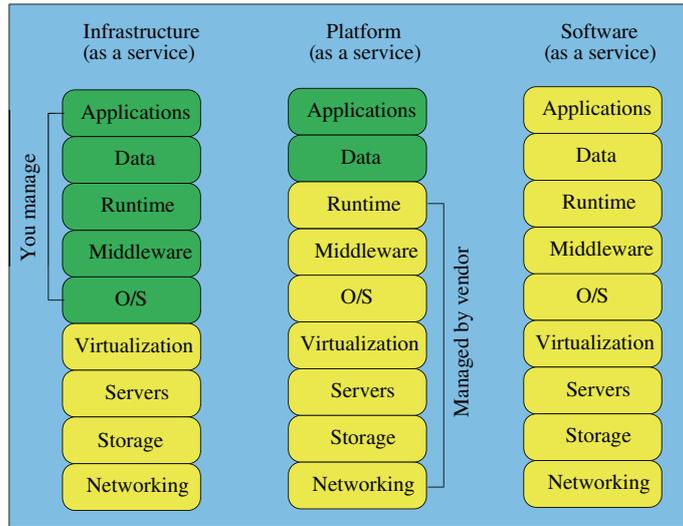


图 1 (网络版彩图) 基于云计算的网络架构

Figure 1 (Color online) The network architecture based on cloud computing

从其诞生到现在, SDN 已经从初始的基于 OpenFlow 的狭义定义转变为更为广泛意义上的 SDN [14,15] 概念. 广义的 SDN 泛指向上层应用开放资源接口, 实现软件编程控制各类网络架构. 结合当前网络架构与网络需求, 现在已有许多基于此的架构设计方案 [16~21]、性能分析、功能实现和增强 [22~24] 等的相关研究, 在某些应用场景也能够取得较好的成果.

### 2.3 平行网络的提出

SDN 解耦了实际网络软硬件, 使得网络更加灵活可控. 然而对于复杂网络系统的动态优化和评估, 包括网络事先准确性评估、网络运行动态修正和网络资源全局化等, 基于 SDN 的网络架构并没有相关解决办法. 基于 SDN 的网络架构可以实现对全局网络的整体调控和管理, 然而, 在当前的复杂网络环境和连接随时随地、服务无所不在、虚拟与现实合二为一、更强的安全和隐私保护等网络服务要求下, 需要网络改进方案能够预先进行较为全面和准确的评估和修正, 实现对网络的动态优化控制, 而在如何实现这种动态优化控制的问题上, SDN 并没有提供一种较好的解决方案.

为此, 本文提出一种新颖的网络架构——平行网络架构. 平行网络架构引入平行系统理念, 建立与实际网络系统相对应的人工网络系统, 通过在人工网络系统上进行各种计算实验, 实现对实际网络的动态运行状态分析和性能优化, 并给实际系统反馈优化后的指导运行建议, 从而及时改善系统性能, 实现业务容量效率最大化和对用户网络服务需求的协调和优化. 平行网络架构通过人工网络系统与实际网络系统的平行执行, 实现对网络的动态优化管理. 更进一步, 平行网络的计算实验可以对整个网络进行全面准确和及时的评估, 这对于通信网络的移植推广、互联互通, 以及不同网络的优势互补、功能扩展具有指导意义.

## 3 平行网络

平行网络在网络领域中的应用包括实际网络系统和人工网络系统两部分内容. 以平行系统理论为指导, 建立适应现代网络系统的网络模型体系和复杂认知网络动态计算实验平台, 将网络方针系统逐

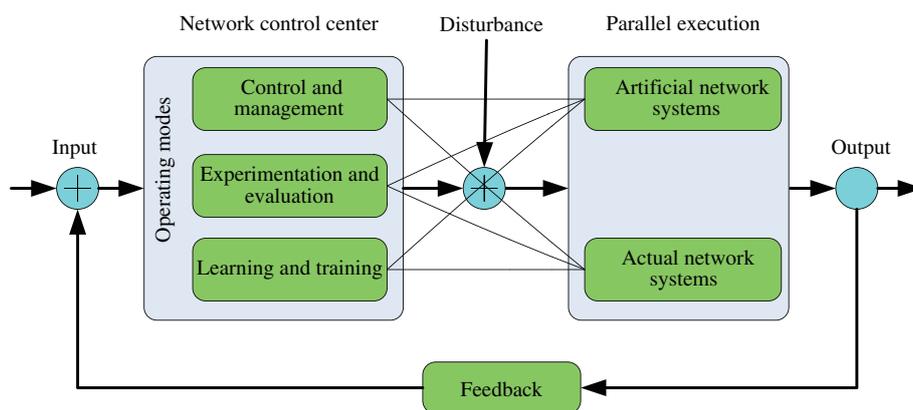


图 2 (网络版彩图) 平行网络基本框架及操作模式

Figure 2 (Color online) The framework of parallel networks and operating mode

渐发展为具有灵活、便捷和广泛特性的人工网络系统,从而有效改善网络现状,提高实际网络系统的信息传递效率和用户体验状态.

### 3.1 平行系统理论

平行系统是指基于 ACP (artificial societies, computational experiments, and parallel execution) 方法,由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统<sup>[25~27]</sup>.通过挖掘平行系统中人工系统的潜力,使其角色从被动到主动、静态到动态、离线到在线,以至最后由从属地位提高到相等的地位,使人工系统在实际复杂系统的管理与控制中充分发挥作用<sup>[28,29]</sup>.

平行系统的基本框架主要包括实际系统和人工系统.通过二者的相互作用,完成对实际系统的管理与控制、对相关行为和决策的实验与评估、对有关人员和系统的学习与培训等.平行系统的主要目的是通过实际系统与人工系统的相互连接,对二者之间的行为进行对比与分析,完成对各自未来状况的“借鉴”与“评估”,相应地调节各自的管理与控制方式,达到实施有效解决方案以及学习和培训的目的<sup>[28,30~32]</sup>.

### 3.2 平行网络介绍

以平行系统理论以及网络软件化思想为指导,建立适应现代网络系统的网络模型体系和复杂认知网络动态计算实验平台,将网络仿真系统发展为具有灵活、便捷和广泛特性的人工网络系统,从而有效地改善网络现状,预估网络状态,更好地满足不断提高的网络系统需求.平行网络的基本研究内容包括:(1) 建立在网络系统领域的平行系统运行基本框架,以及人工网络系统与实际网络系统的相互作用方式,如图 2 所示;(2) 逐步实现和完善人工网络系统,将网络仿真系统逐渐发展为人工网络系统;(3) 建立网络领域的平行系统多目标、多有效解决方案的评价体系;(4) 建立适用于网络领域的平行系统的一套完整、系统的分析和优化方法;(5) 建立利用计算实验对实际网络系统的组成与行为进行评价和控制的方法.

在传统路由器或交换机设计中,快速的报文转发(数据面)和高层的路由决定(控制面)集成在一起.这种紧耦合大型主机式的发展限制了 IP 网络创新技术的出现,技术人员更多的是不断对现有网络进行修补,从而造成了交换机/路由器设备控制功能的高度复杂.与此同时,由于网络设备封闭,没

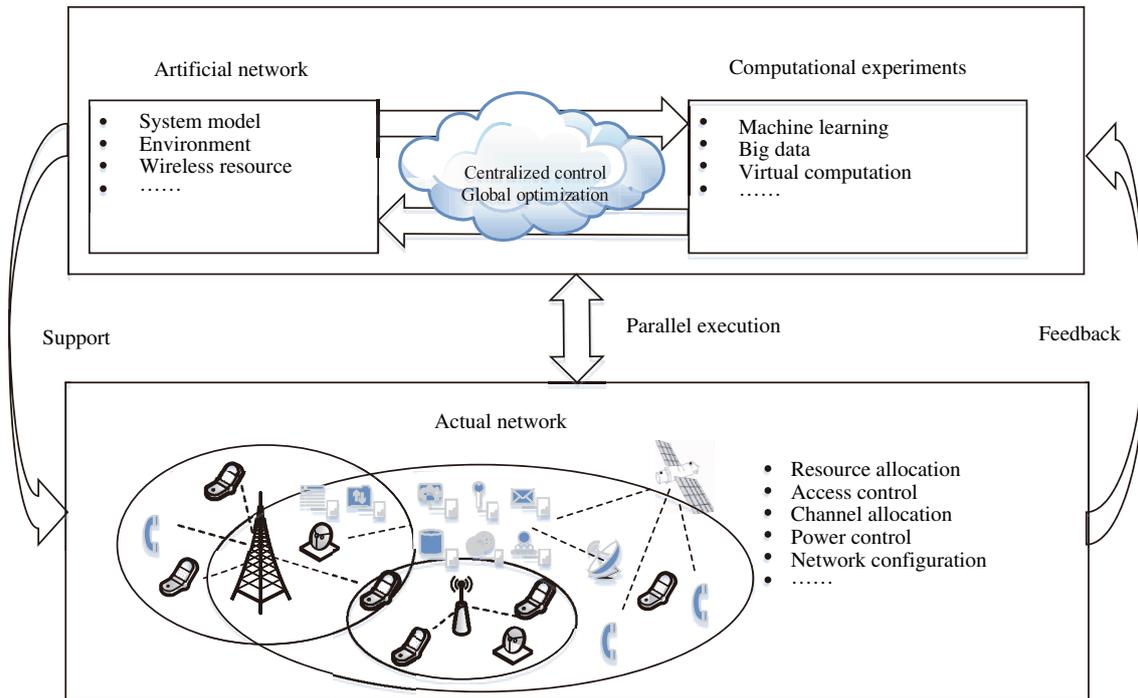


图 3 (网络版彩图) 平行网络架构图  
 Figure 3 (Color online) The framework of parallel networks

有提供开放的 API, 无法对网络设备进行自动化配置和对网络流量进行实时操控, 导致研究人员几乎不可能在真实网络中基于真实网络流量进行大规模网络实验。

平行网络中的人工网络架构采用创建虚拟的网络容器的方法, 这些容器之间在逻辑上彼此隔离, 但可共享相同的底层物理网络, 从而通过集中控制器中的软件平台的可编程化来控制底层硬件, 实现对网络资源灵活的按需调配。在人工网络中, 网络设备只负责单纯的数据转发, 可以采用通用的硬件; 而原来负责控制的操作系统将提炼为独立的网络操作系统, 负责对不同业务特性进行适配, 而且网络操作系统和业务特性以及硬件设备之间的通信都可通过编程实现。通过开放的软件定义 API 实现网络功能的灵活重构, 改善网络的扩展能力和灵活性。控制应用只需要关注自身逻辑, 而不需要关注底层更多的细节实现。同时逻辑上集中的控制平面可以控制多个转发面设备, 也就是控制整个物理网络, 因而可以获得全局的网络状态视图, 并根据该全局网络状态实现对网络的优化, 从而满足用户的各项需求。

### 3.2.1 平行网络架构

平行网络的核心是整网协调, 并实现中心控制和全局优化。如图 3 所示, 平行网络包含实际网络和人工网络, 实际网络实时给人工网络反馈实际网络的运行状态, 人工网络根据这些数据进行改进, 使其与实际网络一致。在人工网络的基础上, 计算实验通过各种计算方法、已有的数据和网络系统需求等对实际系统运行状态进行评估、预测, 并为实际系统提供相应的优化方案, 实际系统依据这些优化方案进行改进, 整个系统在这一动态、滚动的状态下不断改进和提升。

人工网络作为计算实验的基础,把认知网络对物理资源的优化和智能网络对人的需求的动态响应结合起来,使实际网络与人工网络平行互动,形成大反馈,最终形成平行网络理论.

实际网络就是现实中正在使用或将要使用的网络,如家庭组建的无线局域网、基于现有网络架构的城域网,甚至正在发展的基于 SDN 架构的网络都可以看做实际网络.实际网络系统为人工网络系统提供实时网络状态数据,人工网络系统根据数据得到实时决策及行为指导方案,方案应用到实际网络系统中,再进行实时网络数据调查,根据实时网络状况,对方案进行再次优化.通过这样往复且科学、系统的方法得到效果评价指标,最终确定优化、控制和资源调度方案,动态地使整个网络向目标状态收敛.(1)人工系统实现了解耦与开放的功能,把底层的硬件封装起来,留下软件接口(除特别说明,文中提到的接口是指不同层级、不同系统之间的信息交互,用于完成各个模块的数据、控制信号的传递和修改,而不影响其他层级、系统与它的交互),既保护了底层,又方便后续从高层操作.即将物理系统中的模型的属性抽象出来,构建人工模型,从而在对人工模型的控制过程中,无需再考虑整体物理模型之间高度耦合关系和不确定的相互作用.平行网络相当于把底层硬件通过软件平台整合起来,形成一个与底层硬件相对独立的软件可控制的系统,无需在整体控制和优化中针对底层硬件部署.(2)在人工网络的基础上,利用人工网络提供的抽象的控制接口模型,进行计算实验,实现了集中控制、整体优化和决策的功能.参考模型自适应控制方法是基于人工模型提供的软件接口,针对人工模型反馈的参数进行计算和优化,从而无需考虑物理实现的具体控制手段.所得反馈参数也是对物理系统进行属性封装之后获得,无需考虑物理层具体的数据采集方法.相当于使用已得到的软件接口,对网络整体进行规划操作和编程实现.(3)在“不断探索和改善”的原则下,结合从定性到定量的综合集成思想和分布并行的高性能计算技术,利用人工系统、计算实验、平行执行等理论和方法,建立平行网络系统控制与管理的理论和方法体系.从而通过实际网络系统与人工网络系统的交互过程,提供网络管理、控制、调度和资源分配等措施,使网络系统迅速达到最优化.

### 3.2.2 人工网络

**人工网络系统架构.**人工网络架构基于软件定义网络的思想,采用转发与控制分离、控制逻辑集中和网络能力开放的方式.

(1)创建虚拟的网络容器:这些容器之间在逻辑上彼此隔离,但可共享相同的底层物理网络,即叠加的概念:一个数据包(或帧)封装在另一个数据包内;被封装的包转发到隧道端点后再被拆装.从而满足虚拟化数据中心需要在任意时间、任意地点移动主机的需求.

(2)开放可编程接口:为控制平面提供开放可编程接口.控制应用只需要关注自身逻辑,而不需要关注底层更多的实现细节.

(3)逻辑上的集中控制:逻辑上集中的控制平面可以控制多个转发面设备,也就是控制整个物理网络,因而可以获得全局的网络状态视图,并根据该全局网络状态视图实现对网络的优化控制.

把底层硬件通过软件平台整合起来,形成一个与底层硬件相对独立的软件可控制的系统,无需在整体控制和优化中针对底层硬件部署.

如图 4 所示,人工网络的典型架构共分 3 层.最上层为应用层,包括各种不同的业务和应用.中间的控制层主要负责处理管理数据平面资源的编排,维护网络拓扑、状态信息和资源分配调度等.可软件定义的控制器作为开放式控制架构的主体,是实现可编程功能的核心,控制器为上层应用提供统一的开发接口,并通过开放式硬件控制接口与底层硬件交互,以实现可编程化控制和管理(如 OpenFlow、虚拟可扩展局域网(VXLAN)等协议).最底层的基础设施层负责基于流表的数据处理、转发和状态收集.

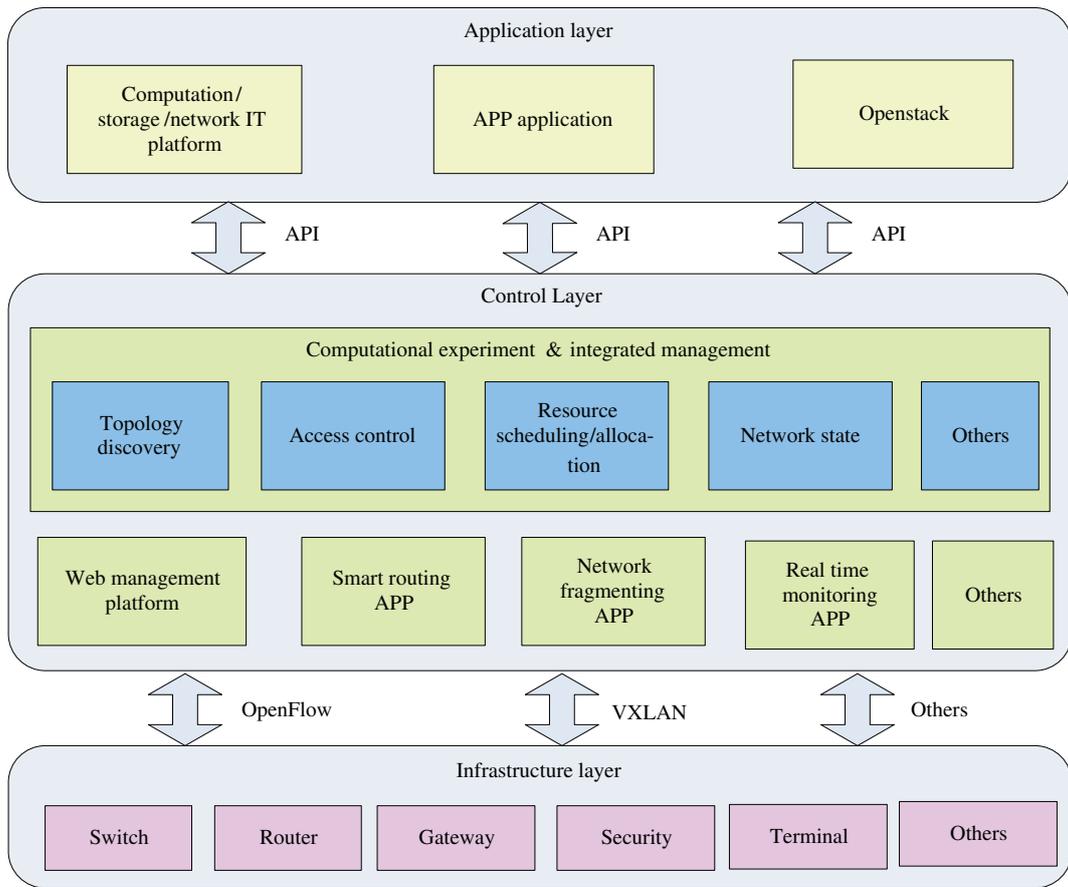


图 4 (网络版彩图) 人工网络架构

Figure 4 (Color online) The framework of artificial networks

控制层中控制软件与基础设施中的交换/路由等网络设备经由控制数据面接口交互, 与应用层各种 APP 经由开放 API 交互; 网络基础设施充当原交换/路由设计中的转发面角色. 控制层通过对底层网络基础设施进行资源抽象, 为上层应用提供全局的网络抽象视图, 并由软件实现, 摆脱硬件网络设备对网络控制功能的捆绑.

**人工网络建模方法.** 基于平行系统中人工系统的建模方法, 人工网络依然采用基于代理的建模方法. 代理的主要特征是自主性、社交能力、学习与进化自适应能力, 以及移动能力等. 利用代理方法描述分析人工网络系统可以分为 3 个部分, 即代理本身、代理的环境和社交规则. 代理可以是人工网络系统中的各种网络设备或网络用户, 它们具有自己的内部状态、行为规则、思维方式和生长过程, 并随着时间和外部环境的变化而变化. 代理的环境是各种代理们赖以生存和活动的空间, 是它们的“生命”舞台, 既可以是现实网络和社会环境的反映, 也可以是虚拟的数学或计算过程. 代理环境一般表现为存放社会物资, 制定相关法规、标准, 以及设计人和生物生存与活动的各种功能场所, 以及它们所形成的网络. 当然, 这些场所的取舍是以对网络行为的影响为标准而决定的. 代理的社交规则是指代理本身、场所本身、代理之间、场所之间、代理与场所之间的准则和步骤, 从简单的数据发送与接收的协议到复杂的大型网络系统管理方法、性能优化算法等.

在当前网络研究过程中, 由于实验条件的限制, 通常采用软件平台搭建一个网络系统环境, 然后

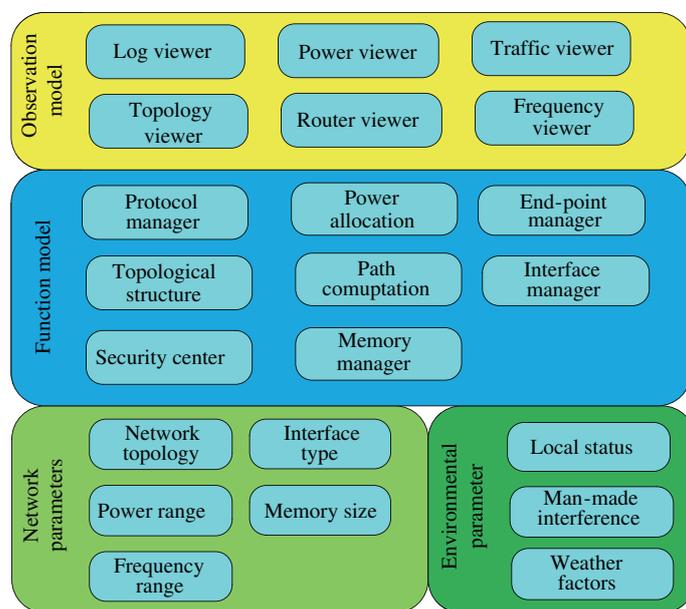


图 5 (网络版彩图) 人工网络模型结构

Figure 5 (Color online) The model of artificial networks

在该系统环境下对各个研究成果进行实验验证. 以当前比较热门的 SDN 研究为例, 由于 SDN 是针对一个大型完整的网络研究, 因此提供实际硬件环境对 SDN 进行研究比较困难. 而 Mininet 的出现则解决了这一问题, 它能够快速建立一个大型的虚拟网络系统, 研究者可以在 Mininet 的基础上安装合适的控制器, 如 NOX/POX, Trema, Ryu 和 Floodlight 等就可以在该环境下进行各项技术的研发、验证, 同时所有代码几乎可以无缝迁移到真实网络.

对于人工网络系统的建模与搭建, 首先使用仿真软件建立人工网络模型 (Mininet 和 Floodlight 可以建立一个虚拟网, 并实现对拓扑管理、设备管理、路径计算、Web 访问和管理等的控制), 然后通过网络仿真器增加模块、扩展功能 (如功耗管理、接口管理和资源分配等), 完善人工网络系统模型, 之后在增强后的网络仿真器建立的人工网络中, 增加与之对应实际网络中特殊变量、模型 (如针对该网络区域所处位置干扰较强增加干扰参数, 针对不同时间段流量变化建立流量变动模型等), 从而逼近实际网络, 实现对人工网络模型的搭建.

在人工网络模型建立过程中, 如图 5 所示, 首先根据实际网络情况以及网络环境, 确定网络参数 (节点位置、接口类型和功率大小等) 及环境参数 (涉及当地法律法规、人为因素和自然环境因素等), 使人工网络尽可能地逼近实际网络. 在此基础上, 将网络功能模块化, 各个模块具备实际网络的某一项或几项功能, 模块之间除了部分参数相关联之外, 其余部分都保持独立, 这样不仅让人工网络逼近实际网络, 而且其模块化的特点也利于网络的扩展和管理. 观察模块用于观察人工网络的运行状况, 包括功率、流量和路由等, 这些参数可以用图形化界面或数字显示, 同时存储在日志表中, 为对比、观察、分析和优化网络性能提供实验数据.

在人工网络建模过程中, 需要综合考虑实际网络需求, 针对不同的网络需求, 设计不同精度要求的人工网络. 举例来说, 针对电信 LTE 网络, 从网络覆盖、呼叫建立、呼叫保持、移动性管理、时延和系

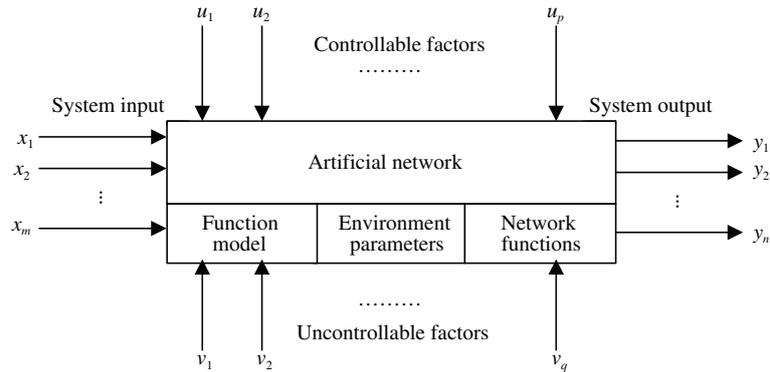


图 6 计算实验过程

Figure 6 The procedure of computational experiments

统资源等几个方面入手,按感知评估和优化分析对所有指标进行细分,明确指标的名称、用途、定义、计算公式和统计粒度.分析各指标之间的约束关系、关联的参数和取值门限.针对不同的业务流,如视频、网页浏览和上网听歌,进行深入的测试,给出不同的业务流下保证用户感知的指标门限,形成指标门限与用户感知程度的对应关系表.挑选对用户感知影响较大的关键指标,给出提高指标的优化方法,从而更有效合理地设计相应的人工网络.通过研究指标门限和用户感知程度的对应关系,可以对用户的感知有更准确的把控,为精细化维护实际网络系统提供强有力的数据支撑.

### 3.2.3 计算实验

计算实验是通过对人工网络进行各种“实验”,对网络行为进行分析和预测,从而指导实际网络运行.因此一个科学而完善的计算实验设计至关重要.

计算实验特点主要有:针对不同对象进行多种预测/推测、在线/平行执行,针对多重世界或多重网络构成复杂多元和自底向上涌现生成的计算实验方法等.

(1) 利用人工网络系统提供的抽象控制接口模型,进行计算实验.参考模型自适应控制,基于人工模型提供的软件接口,针对人工模型反馈的参数进行计算和优化;

(2) 无需考虑物理实现的具体控制手段;

(3) 所得反馈参数也是对实际系统进行属性封装之后获得,无需考虑物理层具体的数据采集方法,从而使用已得到的软件接口,对整体进行规划操作和编程实现.

一般来说,计算实验用于研究系统或过程的性能.这些系统或过程是由代理、物、方法以及其他资源构成,给系统或过程一个输入,就会得到相应的输出结果.在计算实验中,系统自身的变量以及其他因素有些是可控的,有些是不可控的.计算实验需要确定哪些参数对系统的响应最有影响;如何设置有影响的因素以使系统的响应总是接近希望的水平,使系统的响应变异性较小,以及使不可控因素的作用最小等.图 6 给出了计算实验的一般过程,其中,

$x_i$ : 人工网络系统的输入,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;

$y_j$ : 人工网络系统的输出,也就是响应,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$u_k$ : 人工网络系统的可控因素,  $k = 1, 2, \dots, p$ ;

$v_l$ : 人工网络系统的不可控因素,  $l = 1, 2, \dots, q$ .

计算实验的主要任务和目的包括: (1) 确定哪些因素对系统的响应最有影响; (2) 如何设置有影响

的因素以使系统的响应总是接近希望的水平; (3) 如何设置有影响的因素以便使系统的响应变异性较小; (4) 如何设置有影响的因素以便使不可控因素的作用最小。

平行网络中的计算实验是指优化计算实验, 即快速、高效地确定影响实验结果的最优实验条件。优化实验的内容十分丰富, 可以分为以下几种类型: (1) 按计算实验因素数目的不同可以分为单因素优化计算实验和多因素优化计算实验。单因素优化计算实验可以采用包括均分法、黄金分割法、对分法和 Fibonacci 法等统称为优选法的多种方法; 对于多因素优化计算实验, 首先需要确定计算实验因素数目、取值范围, 并尽可能使这些因素可计量, 然后采用诸如正交实验设计、均匀设计等方法对实验进行设计。(2) 按计算实验目的的不同可以分为指标水平优化和稳健型优化计算实验。指标水平优化以实验指标最优为目的, 稳健型优化以减少实验指标的波动为目的。(3) 按计算实验过程的不同可以分为序贯计算实验设计和整体计算实验设计。序贯计算实验是从一个起始点出发, 根据前面的实验结果决定后面的实验位置, 使实验指标不断优化, 比如 0.618 法、二分法等。整体计算实验要求实验点能均匀地分布在全部可能的实验点中, 依据实验结果确定最优实验条件, 比如正交设计法和均匀设计法等。

以无线网络的覆盖优化为例, 其主要是通过调整天线下倾和站点功率实现。对于日常输出功率较低, 但具有高配功放的站点, 可以将其功放转移至输出需求较高, 但是低配功放的站点。对于室分系统, 可以根据日常话务量, 将低话务量场所转移至高话务量场所。对于基站设备, 可以将一台基站设备通过三功分裂化为 3 个扇区, 达到资源利用率的最大化。

计算实验通过分析历史基站实际输出功率、实际需求功放、各基站实际话务量等信息, 以及实际网络中人为、环境造成的突发干扰因素, 采用合适的分类、预测 (如决策树、Bayes 方法等) 以及其他优化算法等对这些参数进行统计、分类和预测, 得出在不同需求功放、话务量下天线下倾角和站点功率的最优选择, 从而给出在不同实际网络环境下的最优覆盖优化指导方案, 如图 7 所示。

实际平行网络应用中, 大多数情况下计算实验结果需要及时反馈给实际网络。如果采用前面的方法设计、计算和优化, 将会有很大的延迟性, 从而不能给实际网络及时指导, 为此新增一个查表映射模块。

具体地说, 在实际网络与人工网络交互之前, 人工网络通过已有的数据、参数已经进行部分计算实验, 并将这些输入参数与计算实验结果以映射的方式存储下来。实际网络需要实时指导时, 首先确定反馈参数, 然后通过一些特定的算法 (如查表法) 将反馈参数与人工网络中存储的输入参数进行映射、比较, 找出输入参数组中与反馈参数拟合度最高的一组, 之后将该组参数映射的计算实验结果提供给实际网络, 从而实现实时无延迟的指导。与此同时, 在后台, 计算实验针对实际网络反馈的参数设计并运行相关实验, 得出结果, 并把这组输入参数与实验结果保存, 更新映射, 从而使得计算实验内容随着时间的推移更加丰富, 对实际网络的实时指导也更加精确。

### 3.2.4 平行执行

通过实际网络, 修正人工网络系统的模型, 使其成为实际网络的“备用”网络。只有当人工网络足够精确逼近实际网络时, 通过对人工网络进行各种统计计算实验, 来相应调整实际网络系统的管理与控制策略, 才具有实际意义。因此, 实施真正意义上的平行执行需要满足平行执行条件, 包括: (1) 人工网络模型精度满足逼近的要求; (2) 人工系统的实时性需要得到有效满足。

通过平行执行, 使得在有限带宽的条件下, 为网络内用户终端提供业务质量保障, 其基本出发点是在网络话务量分布不均匀、信道特性因信道衰弱和干扰而起伏变化等情况下, 灵活分配和动态调整无线传输部分和网络的可用资源, 最大程度地提高无线频谱利用率, 防止网络拥塞和保持尽可能小的

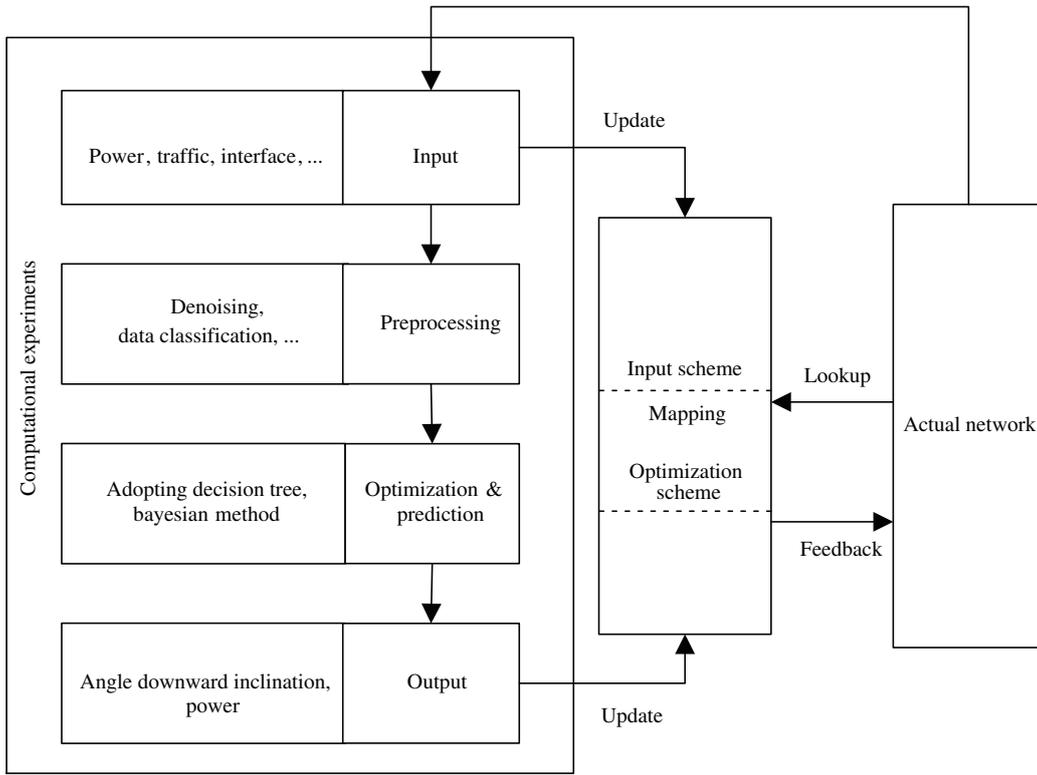


图 7 计算实验示例

Figure 7 An example of computational experiments

信令负荷.

如图 8 所示, 通过平行执行, 修正实际网络系统状态, 同时也可以调整人工网络状态, 从而改善优化网络资源管理 (功率控制、信道分配、调度、切换、接入控制、负载控制、端到端的 QoS 和自适应编码调制等), 达到优化网络性能的目的.

(1) 平行网络类型

根据网络业务及服务要求的不同, 平行网络可以分为两类, 分别是小尺度平行网络和大尺度平行网络.

小尺度平行网络主要针对用户感知体验要求高的网络, 该网络系统可以分为控制中心和现场执行两部分, 分别对应人工网络和实际网络. 控制中心将实现网络范围内网络信息的统计、分析和预测. 通过收集、统计现场执行过程中设备及用户的信息, 并结合历史数据和决策方案进行分析, 从而实现对实际网络运行状况评估; 然后在当前状况分析的基础上, 预测下一时间段的网络流量、资源使用、消耗功率和网络负载等网络参数; 最后综合预测网络参数与实际网络参数, 采用合适的算法、方案, 给出现场执行的优化指导.

控制中心预测的时间段长度是预测功能所需要考虑的重要参数之一, 它对预测精度和优化能力都有影响. 预测时间越长, 优化功能可以调整的参数越多. 例如, 预测时间如果在 1 分钟以内, 我们可能只能优化频谱资源分配等参数, 而对于功耗等问题则由于时间比较短, 没有足够数据支持其优化. 同时预测时间也不是越长越好 (如信道预测), 现场执行会受到很多事先无法预测的随机因素的干扰, 预测时间越长, 预测结果与实际情况的偏离越大, 预测结果的参考价值也越低.

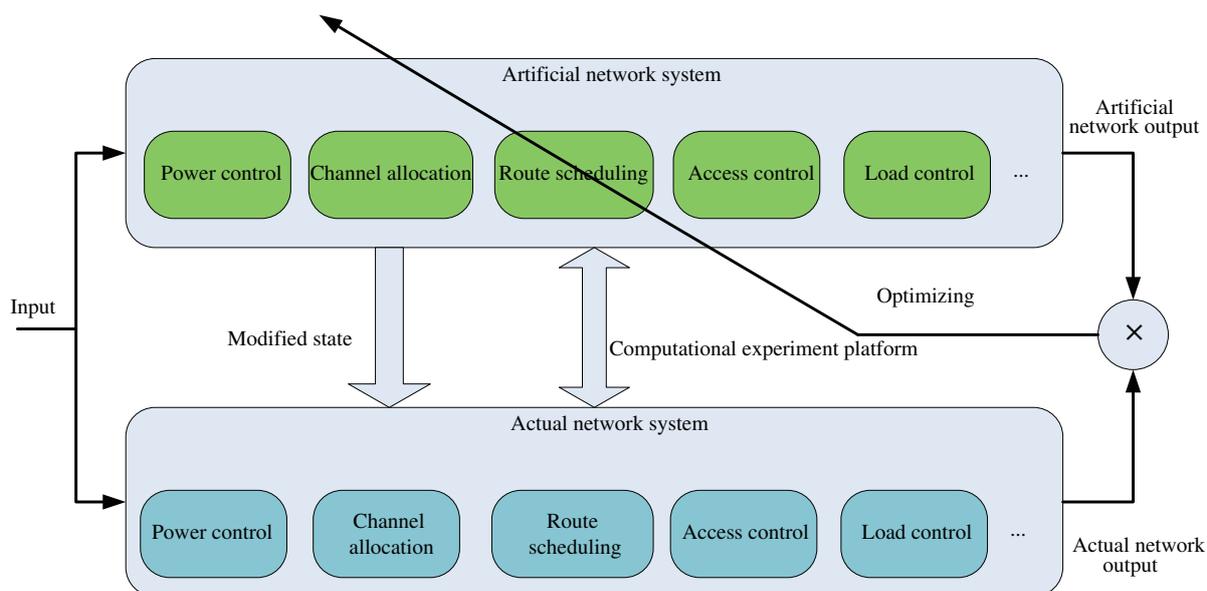


图 8 (网络版彩图) 平行执行框图

Figure 8 (Color online) The framework of parallel execution

另外, 现场执行对网络的实时性要求很高, 因而控制中心需要快速给出优化指导意见, 保持网络的实时性, 而传统算法对于大量数据的处理能力和效率明显无法满足网络需求. 考虑到控制中心的巨大运算能力和高速存储能力, 可考虑采用机器学习、大数据处理等算法来解决这些问题.

针对户感知体验要求低的网络, 用户感知指标门限低, 可以配置大尺度平行网络. 例如, 单一控制中心统筹管理整个现场执行比较困难, 参照现在的“云”网、“雾”网以及“云雾”结合的网络架构模式, 在平行网络中引入区域控制协调单元, 将该平行网络分解为多个平行网络子系统. 各个网络由区域控制协调单元直接管理优化, 而控制中心则对区域协调控制中心直接管理和控制, 并对现场执行单元间接管理和控制. 通过对网络进行宏观分析, 基于平行网络系统提炼的分析规则和优化方法对网络进行宏观分析和验证, 并通过现场测试、查勘和参数修改验证分析方法的有效性.

总的来说, 平行网络结合开放、云化的理念来提升网络弹性和虚拟化能力, 将网络底层的计算、存储和交换路由硬件设备封装形成资源池, 可以灵活调度、按需使用, 并有效地降低网络成本, 使得网络可以根据用户的需求进行弹性配置, 从而满足不断变化的需求, 适应电信运营商业模式的迅速变化. 如何根据不同层次、不同用户需求的网络系统, 设计最优的平行网络, 从而在保证满足网络不同精度需求的前提下, 获得网络整体资源的最优管理与分配、网络的最优运行状态及服务质量, 成为平行网络系统拟解决的关键问题.

## (2) 平行执行方法类型

**整体平行执行 (overall parallel execution, OPE).** 将人工网络、实际网络分别看作不可分割的整体, 强调整体的一致性, 可以利用人工网络进行实际网络的整体预测和平行控制. 这里人工网络建立的模型需要包含实际网络的所有部分, 但不追求建模的精度, 只追求整体属性的一致性. 人工网络与实际网络有相同的输入, 实际网络的输出指导人工网络模型的修正, 人工网络满足一定目标要求后, 可成为实际网络的虚拟替代版本. 根据人工网络模型, 计算实验平台可以离线或在线直接对实际网络状态进行实验, 从而可以直接修正实际网络相应状态, 使之满足目标要求.

**局部平行执行 (partial parallel execution, PPE).** 将人工网络、实际网络的某个部分、某些部分或全部部分对应相连, 局部动态平行执行. 局部平行执行时, 相连的人工部分与实际部分的输入输出应具有 consistency, 此时人工部分模型应与实际部分模型接近. 局部平行执行的显著特征是人工网络的整体输出与实际网络的整体输出不是完全的动态平行, 没有整体特性一致的要求, 只有局部可以进行平行反馈.

**混合平行执行 (mixed parallel execution, MPE).** 将人工网络、实际网络的某个部分或某些部分等分别相连, 修正局部模型, 同时又要求整体特性的一致, 这是整体平行执行和局部平行执行的混合体. 实际上, 任何一个复杂系统可能由若干个复杂子系统构成, 因此, 对大多数复杂系统构建的平行系统多采用混合平行执行方式.

如果优化目标是基本组件的个体一致性、子系统的局部一致性和整体一致性, 那么人工系统与实际系统构成的平行系统需要采用混合执行方式; 如果优化目标只需要某个或某几个基本组件一致性, 某个或某几个子系统局部一致性, 平行系统需要采用局部平行执行方式; 如果优化目标是人工系统只需呈现出实际系统的整体行为和功能即可, 平行系统需要采用整体平行执行方式, 不需要追求人工构件或组件与实际的相一致.

### 3.3 平行网络应用

网络架构的设计是计算、优化及传输成本的折中. 网络架构是采用集中式架构还是分布式架构, 以何种程度集中控制或分布化, 是网络架构设计需要考虑的重要问题. 开展面向未来网络系统的服务需求、技术需求、频谱需求、用户体验以及无线业务特征和商业发展模式的研究, 将有助于从宏观上把握技术应用的动向和对整个系统各个层面的需求, 从而最终设计出符合未来发展要求的网络系统, 按需实现网络架构的灵活构建和功能配置.

平行网络控制逻辑集中的特点, 使得平行网络控制器拥有网络全局拓扑和状态, 可实施全局优化, 提供网络端到端的部署、保障和检测等手段; 同时, 平行网络控制器可集中控制不同层次的网络, 实现网络的多层多域协同与优化.

平行网络能力开放化的特点, 使得网络能力虚拟化、服务化, 网络不再仅仅是基础设施, 更是一种服务, 平行网络的应用范围得到了进一步的拓展. 通过实际网络系统与人工网络系统的交互运行和过程演绎, 能以最短的时间得到最佳的优化方案. 平行网络的思想可用于任何现有网络及下一代网络中, 从而更有效的优化网络运行状态, 满足不同用户的网络需求.

如图 9 所示, 平行网络具有以下特点:

- (1) 接入控制与承载分离: 大区范围覆盖与大带宽承载功能分离、全局控制功能抽离;
- (2) 接入集中控制与管理: 干扰协同管理、资源联合调度与协同处理、自适应接入选择与业务分流、虚拟小区构建等;
- (3) 网络虚拟化: 虚拟网络构建与差异化管理;
- (4) 可编程和灵活性: 网元功能虚拟化、网络能力开放与定制等.

#### 3.3.1 全局决策实时优化

网络决策是指包含网络运行指导、网络分工、网络状态和参数设置等的一组信息, 实际网络系统根据网络决策对其自身进行调整、重组, 实现对网络的优化控制及管理. 云网架构的新兴发展改进和提升了现有网络的性能. 与此同时, 雾网概念的提出是针对云网络的扩展, 该理念使得“云”端设备更

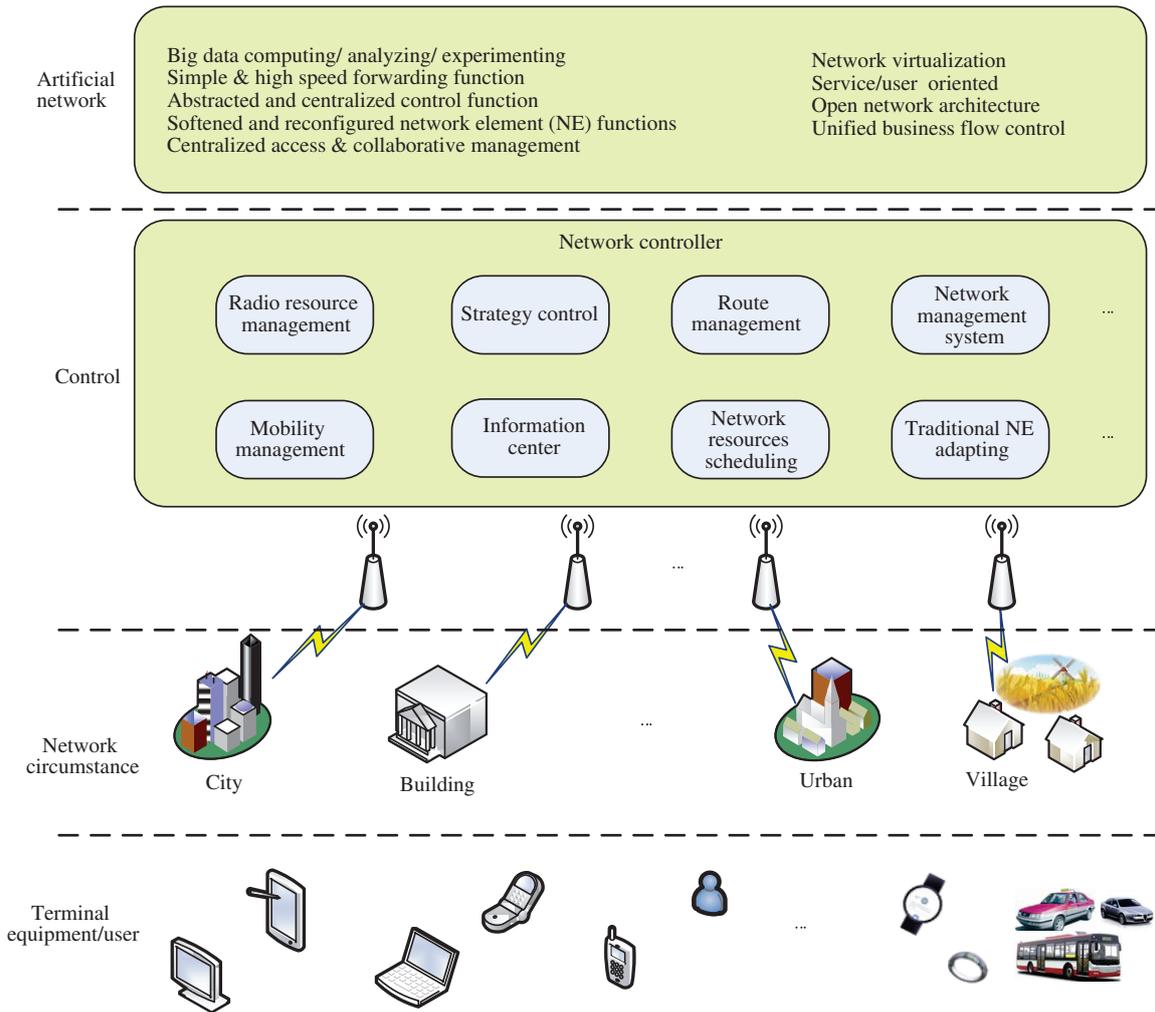


图 9 (网络版彩图) 平行网络应用框图

Figure 9 (Color online) The application of parallel network

加广泛且多样化, 包括具有计算处理能力的终端用户设备、接入点、路由和交换机等. 未来的网络将是云雾结合、优化部署、相辅相成的网络, 通过平行网络的交互指导, 将更好地支持、优化网络负载和网络服务.

云网中的云通常被描述为各种硬件设施 (如路由、交换机和控制器等) 的集合以及数据中心执行的基于服务的应用程序、数据库等. 与此类似, 雾网被看作是全局网络的终端网络, 将云端的一些计算处理需求转移到终端来实现. 如图 10 所示, 平行网络将充分挖掘云网与雾网的优势, 尤其是两者之间的资源交互及调度服务等存储和计算能力的协调优化. 雾网平台用于支持实时、快速的分析及处理, 并过滤数据, 同时把这些数据传递给云端, 为全局管理提供支撑. 在网络用户对实时性要求高的情况下, 云端处理需要较长的处理时间, 无法快速处理网络需求; 同样, 在对网络时延要求低但对网络运行决策优化要求严格的情况下, 雾网终端的快速处理往往不能满足网络用户对最优资源管理与分配的要求. 因此, 通过实际网络与人工网络的交互, 平行网络能够根据用户对网络各项指标 (时延、资源配置和服务质量等) 的不同需求, 为网络提供指导、方法、模型和算法等来优化实际网络的性能, 从而充分

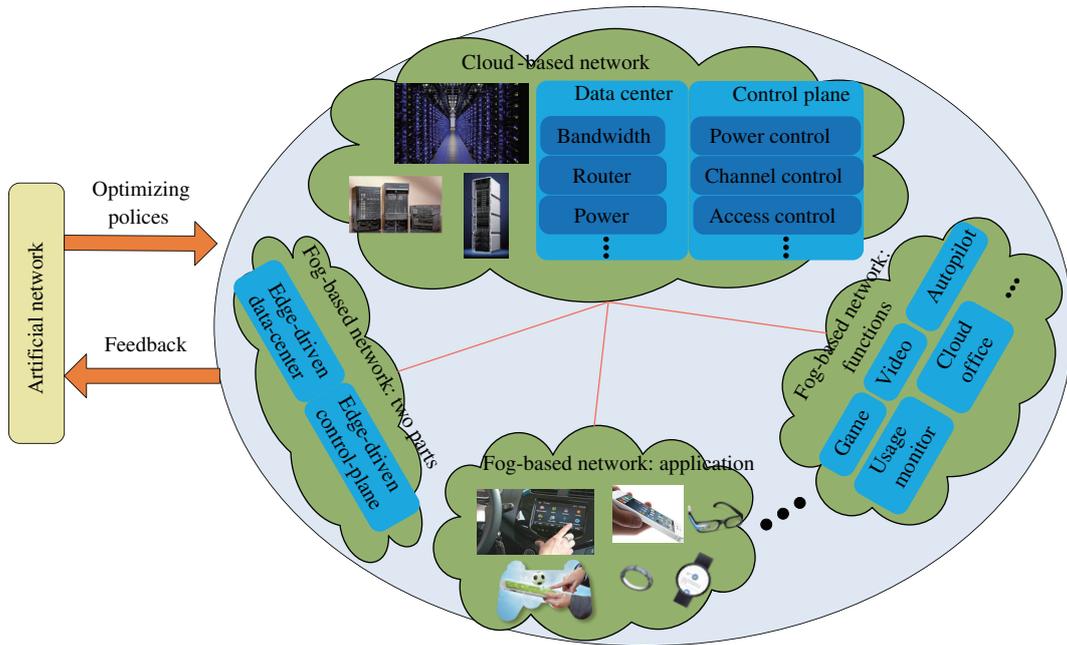


图 10 (网络版彩图) 全局网络实时指导

Figure 10 (Color online) The global network real-time guidance

利用云雾结合的网络优势. 相应地, 实际网络反馈给人工网络的信息和数据可以进一步调整和优化人工网络模型, 从而实现对实际网络更精准的预测和估计.

举例来说, 网络突发事件是难以避免的, 因此必须加强对网络的应急处理手段, 尽量控制并减弱风险, 并在发生网络安全突发事件时, 快速反应进行网络调配, 并尽快恢复网络的正常使用. 然而, 目前的应急处理还主要靠人工依靠预案来进行决策, 应急处理响应时间长, 无法快速定位故障点, 并且容易引起故障处理的重复派单情况. 另外, 面对突发的网络需求 (如大型集体活动场地的网络流量需求等), 目前的网络系统无法提前预测并给出合理优化的配置和处理方法. 因此, 通过平行网络系统中人工网络与实际网络的自主运行及平行交互, 主动地获取网络实时状态信息, 及时定位网络故障点, 并给出预警信息, 从而为实际网络提供实时的反馈及对网络运行状态的预测. 一方面, 可完善应急处理的程序与措施, 加强防范并及时处理各种网络安全事件, 提高网络系统的应急恢复能力, 并制定备份, 以及时恢复系统. 另一方面, 提高对网络安全的监控手段, 及时发现问题, 并积极处理病毒侵入、网络攻击和漏洞传播等网络安全问题, 为网络系统提供更精确的策略指导.

### 3.3.2 局部行为实时指导

对于局部或小型网络系统 (如图 11 所示), 平行网络将提供更加精确细致的网络行为指导建议, 优化网络性能. 在传统网络中, 网络服务都是由昂贵、复杂的物理设备 (如路由、交换机和防火墙等) 提供, 这些设备功能比较单一. 因此, 传统网络中, 实际网络的布局和造价限制了整个网络资源及性能的提升. 而平行网络将突破网络硬件资源不统一的限制, 将具有不同功能的网络设备统一为一个简单的网络设备, 并精简现有网络层次, 同时通过软件的方式管理与控制各层网络设备, 最终实现网络软件化.

在传统网络中, 各个网络控制层相互独立, 这使得数据中心不能高效动态地针对实时的网络需求

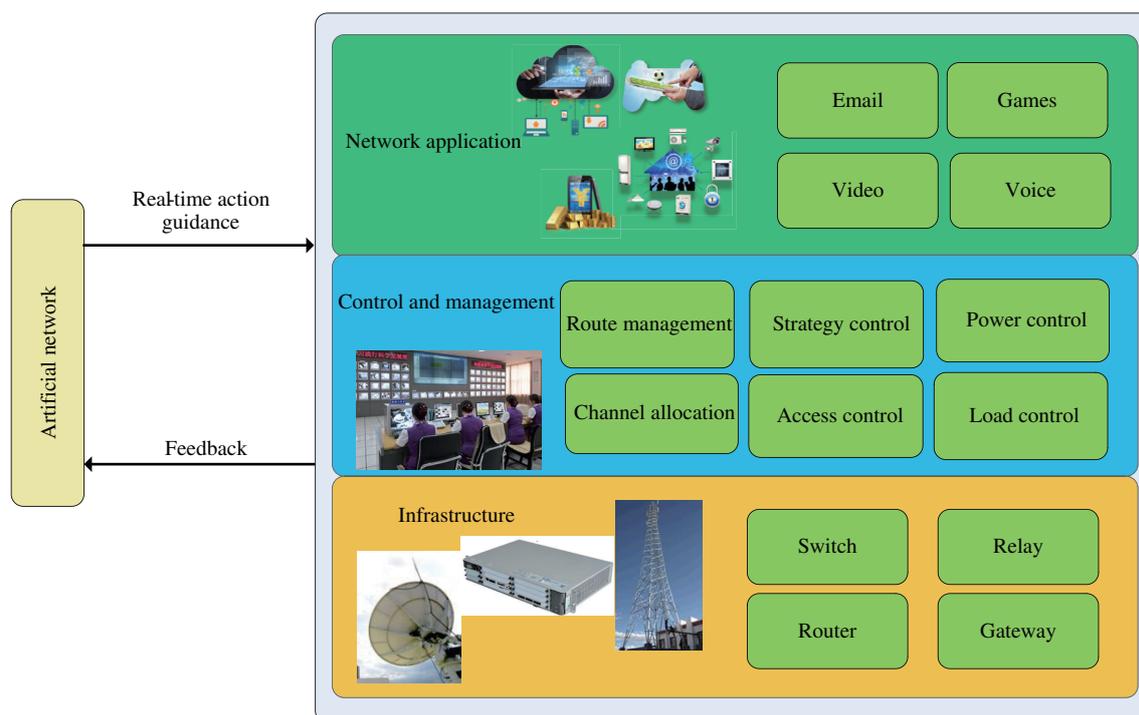


图 11 (网络版彩图) 本地网络实时行为指导

Figure 11 (Color online) The local network real-time guidance

做出最优的行为决策. 通过对网络控制层的软件化, 平行网络能够使用户根据需求对网络进行配置和重配置而不降低系统性能. 其最大特点是通过对实际网络与平行网络的实时交互, 实现对实际网络的实时行为指导 (如路由调度、功率分配、信道分配和接入控制等). 同样, 人工系统也能够依靠从实际网络获取的网络信息对其自身进行实时调整和修正.

举例来说, 不同用户对流量的需求不一样, 目前的网络系统对客户没有进行精细化的分析与管理, 网络资源没有得到最优化的配置. 通过对客户的网络访问习惯进行跟踪、统计及分析, 对不同客户建立相应的后台人工网络系统模型, 通过平行网络系统为用户提供最优的网络配置与流量需求预测, 从而实现从用户的角度更好地了解流量, 如使用情况、位置、设备、时间、日期甚至网络资源方面的情况, 实现端到端流量的可视化, 不仅可以提供更多个性化和更高水平的用户体验, 同时也可以优化利用网络资源, 从而降低总体拥有成本, 吸引那些高附加值的大规模使用数据的用户, 从而获得新的收益良机, 提供符合不同用户满意度的服务.

为了说明平行网络的实际可行性, 用一个基于平行网络的无线资源分配和接口控制技术实例来进行说明. 在本实例中, 仅考虑两个基站 A 和 B, 两个基站的覆盖范围存在部分重叠, 因而当用户在重叠区域时, 可以根据信号强弱选择接入信号最强的基站, 从而保证用户服务质量. 然而, 由于基站之间相互独立, 每个基站的接入信息无法共享, 可能会出现网络内基站负载分布不均、无线资源利用率低, 甚至网络总资源充足, 而由于基站分配不均导致无法接入更多用户问题. 例如假定接入用户都在重叠区域, 并且与 A 基站的信号强度要高于 B, 那么用户都会选择接入 A, 从而导致 A 趋于饱和而 B 处于空闲状态, 当 A 基站非重叠区域进入新用户时, 由于用户只能接入 A 基站, 而 A 已没有资源分配给新用户从而造成新用户无法接入. 基于平行网络的无线资源分配和接口控制技术能够实现对资源的集中

管理和控制, 因而可以实时获取 A 和 B 两个基站的用户接入数目和资源使用率, 基于这些信息, 在重叠区域, 用户选择接入基站不再仅考虑信号强度, 还需要考虑每个基站当前负载状态和资源的使用率问题. 除此之外, 为了能够让接入用户数更多, 该技术还能够对接入用户的基站进行再分配. 如前所述, 当新用户进入 A 基站非重叠区域并且由于 A 基站趋于饱和而无法接入时, 如果 B 基站有足够多资源接入新用户, 而且 A 和 B 的重叠区域有接入 A 基站的用户, 那么可以将接入 A 基站的用户断开, 并连接到 B 基站, 从而在保证用户服务的基础上, 使得接入用户更多. 实验结果表明, 在接入用户较少, 基站比较空闲的情况下, 该技术与传统网络架构下的资源分配差别不大, 然而当基站资源利用趋于饱和时, 基于平行网络的无线资源分配和接口控制技术, 在相同情况下较当前的无线资源分配和接口控制技术可接入的用户数更多, 基站资源利用率更高.

### 3.3.3 未来网络发展的支持

平行网络的特性及优势决定了其在网络中的广泛应用, 并能够取得很好的实际应用成果. 包括以下几方面.

**云计算.** 尽管云计算具有强大的计算能力、海量信息存储和易扩展等优点, 但在服务可靠性、传输速率和安全性等方面还存在不足. 借助平行网络的人工网络和计算实验, 可以对云计算提供多种评估方案以及预测方案, 这对于提高服务可靠性、传输速率等方面有较大帮助.

**大数据.** 大数据的大既是数据量的大, 也是数据处理速度的大, 同时也要求数据传输速度快. 平行网络在大数据的网络传输中, 能够对这些数据进行分类管理, 并对这些数据的发布、扩散提供最优方案, 保证大数据对于数据传输速率的要求.

**智慧城市.** 智慧城市不仅体现在透彻感知和深度计算上, 也体现在全面的互联互通上, 光有感知和计算而不把这些信息与系统相连没有任何意义. 针对智慧城市网络的多样性与复杂性以及网络的巨大性、场景的多变性, 平行网络能够根据不同智慧城市的不同场景、不同需求提供更加精准的网络服务需求.

平行网络的最大特点在于其能够对网络整体运行情况进行预测和实时优化, 使得网络资源利用率、能源消耗和网络服务质量等都保持在最佳状态. 与现有网络架构相比, 平行网络需要实际网络提供多种类型的、实时的数据支撑其运行, 因而要求实际网络具有更强的感知能力, 而为了快速处理并反馈这些感知到的海量数据, 也要求控制中心具有较强的计算能力, 这两者在一定程度上制约了平行网络的实际应用. 而随着技术的发展, 以及物联网、云计算等的兴起, 感知和计算需求将不再是限制平行网络发展的主要问题.

## 4 总结

基于 ACP 方法的平行网络的基本框架就是试图面向网络大数据, 以“人工网络体现/数据说话”为要求, 以“计算实验落实/预测未来”为任务, 以“平行执行贯彻/创造未来”为目标的新一代网络架构. 相信不久, 人工网络数据及网络信号的处理与分析将同实际物理网络信号的处理与分析一样完善有效, 成为实时闭环科学认知网络的基础. 人工网络作为计算实验的基础, 将认知网络对物理资源的优化和网络对人的需求的动态响应结合起来, 实际网络与人工网络平行互动, 形成大反馈, 最终形成平行网络. 实现对网络设备自动化配置和对网络流量及网络资源实时操控与调度.

## 5 展望

SDN 及 NFV 的发展必然会影响人们生活的方方面面,如出行驾驶、日常购物和医疗保健等,将会涌现出多种软件化服务或应用,开启了网络软件化的时代.同时,云端及终端服务器的软件化应用具有各自的优势及缺点.在这种必然趋势下,平行网络能够更有效地调整网络运行状态,满足网络的实时扩展及用户各方面不断变化的需求.并且,平行网络系统将成为网络软件化的重要理论体系支撑.基于 ACP 方法的平行网络的普及,有待完备的算法、工具、系统和平台的建立和使用,涉及多学科、跨学科的综合交叉融合,将是一项长期而艰巨的工作.

## 参考文献

- 1 Casado M, Freedman M J, Pettit J, et al. Ethane: taking control of the enterprise. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2007, 37: 1–12
- 2 McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2008, 38: 69–74
- 3 Lantz B, Heller B, McKeown N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks. In: *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, Monterey, 2010. 19
- 4 Casado M, Freedman M J, Pettit J, et al. Rethinking enterprise network control. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2009, 4: 1270–1283
- 5 Open Networking Foundation ONF White Paper. Software-defined networking: the new norm for networks, 2012
- 6 Wang F Y. Systems softwarization and systems 5.0: CPSS + parallel systems + SDS. *Complex Intell*, 2014, 3: 1 [王飞跃. 系统软件化与系统工程 5.0: 社会物理网络系统 + 平行系统 + 软件定义的系统. 复杂性与智能化, 2014, 3: 1]
- 7 Wang F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems. *IEEE Intell Syst*, 2008, 6: 8–13
- 8 Wang F Y, Tang S M. Concepts and frameworks of artificial transportation systems. *Complex Syst Complex Sci*, 2004, 1: 52–59 [王飞跃, 汤淑明. 人工交通系统的基本思想与框架体系. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1: 52–59]
- 9 Wang F Y, Yang L Q, Cheng X, et al. Network softwarization and parallel networks: beyond software-defined networks. *IEEE Netw*, 2016, 30: 60–65
- 10 Pachauri A K, Ompal S. 5G technology-redefining wireless communication in upcoming years. *Int J Comput Sci Manage Res*, 2012, 1: 12–19
- 11 Fettweis G P. A 5G wireless communications vision. *Microw J*, 2012, 12: 24–36
- 12 Lien S, Chen K, Liang Y, et al. Cognitive radio resource management for future cellular networks. *IEEE Wirel Commun*, 2014, 21: 70–79
- 13 Kuran M S, Tuna T. A survey on emerging broadband wireless access technologies. *Comput Netw*, 2007, 11: 3013–3046
- 14 Hu F, Hao Q, Bao K. A survey on software defined networking (SDN) and openflow: from concept to implementation. *IEEE Commun Surv Tut*, 2014, 16: 2181–2206
- 15 Jarraya Y, Madi T, Debbabi M. A survey and a layered taxonomy of software-defined networking. *IEEE Commun Surv Tut*, 2014, 4: 1955–1980
- 16 Agarwal S, Kodialam M, Lakshman T V. Traffic engineering in software defined networks. In: *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*, Turin, 2013. 2211–2219
- 17 McDysan D. Software defined networking opportunities for transport. *IEEE Commun Mag*, 2013, 3: 28–31
- 18 Arslan M Y, Karthikeyan S, Rangarajan S. Software-defined networking in cellular radio access networks: potential and challenges. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 150–156
- 19 Bernardos C J, Oliva A D L, Serrano P, et al. An architecture for software defined wireless networking. *IEEE Wirel Commun*, 2014, 21: 52–61

- 20 Pentikousis K, Wang Y, Hu W. Mobileflow: toward software-defined mobile networks. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 44–53
- 21 Sama M R, Contreras L M, Kaippallimalil J, et al. Software-defined control of the virtualized mobile packet core. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 107–115
- 22 Sezer S, Scott-Hayward S, Chouhan P K, et al. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks. *IEEE Commun Mag*, 2013, 7: 36–43
- 23 Chen T, Zhang H, Chen X. SoftMobile: control evolution for future heterogeneous mobile network. *IEEE Wirel Commun*, 2014, 21: 70–78
- 24 Sezer S, Scott-Hayward S, Chouhan P K, et al. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 36–43
- 25 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures, and applications. *IEEE Trans Intell Trans Syst*, 2010, 3: 1–10
- 26 Wang F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control Decis*, 2004, 5: 485–489 [王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. *控制与决策*, 2004, 5: 485–489]
- 27 Wang F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Syst Complex Sci*, 2004, 4: 25–35 [王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 4: 25–35]
- 28 Wang F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *J Syst Simul*, 2004, 16: 893–897 [王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析与决策评估. *系统仿真学报*, 2004, 16: 893–897]
- 29 Wang F Y. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. *Complex Syst Complex Sci*, 2006, 2: 26–34 [王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理. *复杂系统与复杂性科学*, 2006, 2: 26–34]
- 30 Wang F Y, Liu D R, Xiong G, et al. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Syst Complex Sci*, 2012, 3: 1–12 [王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 等. 复杂系统的平行控制理论及应用. *复杂系统与复杂性科学*, 2012, 3: 1–12]
- 31 Wang F Y. Computational theory and method on complex system. *China Basic Sci*, 2004, 5: 3–10 [王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. *中国基础科学*, 2004, 5: 3–10]
- 32 Zhang N, Wang F Y, Zhu F, et al. DynaCAS: computational experiments and decision support for ITS. *IEEE Intell Syst*, 2008, 6: 19–23

## Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture

Feiyue WANG<sup>1,2</sup>, Liuqing YANG<sup>1\*</sup>, Xiaoya HU<sup>1,3</sup>, Xiang CHENG<sup>4,5</sup>,  
Shuangshuang HAN<sup>1,5</sup> & Jian YANG<sup>1,5</sup>

1. *The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *Research Center of Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

3. *School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*

4. *School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;*

5. *Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266000, China*

\* Corresponding author. E-mail: ylq.cas@gmail.com

**Abstract** The coexistence of various protocols for current networks leads to extremely complex network systems, which not only limits the development of network technologies, but also cannot meet the growing demands for cloud computing, big data, service visualization applications, etc. With the development of information telecommunication technology, decreasing hardware costs, and the rise of open source packages, network systems have become more dynamic and flexible, and network service providers expect easier access to the information technology market. A new business model and collaborative competition must be formed. However, current network systems are becoming increasingly complex, which also increases project and societal complexity. The attributes of multi-field, dynamicity, and unpredictability lead network systems to be massively complex, making it difficult to comprehensively evaluate and accurately amend their schema. Therefore, as a new network architecture, parallel network is expected to revolutionize the current network situation and meet the evolving demand for network services. The core idea of parallel networking is to construct artificial networks and effectively optimize the network system operations via the interactions between real networks and artificial networks. Through computational experiments and analysis of the artificial networks, a control strategy based on network traffic flow can be continuously tracked and updated in real-time. Meanwhile, the collected operating status of the real network can also be used to optimize the model of the artificial network. These strategies can be applied to all types of network equipment to control network operations. Therefore, it is possible to allocate network resources more effectively, to improve the management and utilization of resources, and to provide new network solutions to address changing network demands more effectively.

**Keywords** parallel networks, artificial networks, computational experiments, parallel execution, SDN (software-defined networking)



IEEE, INCOSE, IFAC, ASME, and AAAS.

**Feiyue WANG** was born in 1961. He received a Ph.D. degree in computer and systems engineering from the Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York in 1990. He is currently a professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. He is a fellow at



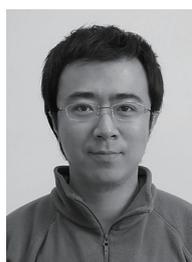
grids. She is a fellow at IEEE.

**Liuqing YANG** was born in 1973. She received a Ph.D. degree in electrical and computer engineering from the University of Minnesota, Minnesota in 2004. She is currently a professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her research interests include communications and networking, acoustic underwater sensor networks, signal processing for power systems, and smart



smart grids. She is a senior member of IEEE, as well as a member of ACM and CCF.

**Xiaoya HU** was born in 1974. She received a Ph.D. degree in control theory and control engineering from the Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China in 2006. She is currently an associate professor with the Key Laboratory of the Ministry of Education for Image Processing and Intelligent Control, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology. Her research interests include wireless sensor networks and



has served as symposium leading-chair, co-chair, and a member of the Technical Program Committee for several international conferences.

**Xiang CHENG** was born in 1979. He received a Ph.D. degree from the Heriot-Watt University and the University of Edinburgh, Edinburgh, U.K. in 2009. He is currently an associate professor at Peking University. His research interests include mobile propagation channel modeling and simulation, next generation mobile cellular systems, intelligent transportation systems, and hardware prototype development. He