



基于 OpenFlow 的网络虚拟化技术研究应用 *

管红光¹, 杨宜镇¹, 任万里², 韩志杰^{2,3}, 季一木³, 孙雁飞³

(1. 华为技术有限公司南京研究所 南京 210012;

2. 河南大学计算机与信息工程学院 开封 475001;

3. 南京邮电大学计算机学院 南京 210023)

摘要:从 OpenFlow、SDN 技术诞生至今,国内外研究机构在诸如部署完全可控、可定制网络实验平台、可编程虚拟化路由技术和 NOX 网络操作系统等方面取得了一定进展。对目前国内外基于 OpenFlow 技术的网络虚拟化领域的相关研究成果进行分析总结,将其与 NFV 技术进行简要对比,并对 OpenFlow 技术在未来科研实验领域更广泛的应用和研究方向进行展望。

关键词:OpenFlow;SDN;网络虚拟化;网络实验平台;网络操作系统;网络功能虚拟化

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.01.015

Research and Application of Network Virtualization Technology Based on OpenFlow

Guan Hongguang¹, Yang Yizhen¹, Ren Wanli², Han Zhijie^{2,3}, Ji Yimu³, Sun Yanfei³

(1. Nanjing Research Institute, Huawei Technologies Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, China;

3. Department of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Since the advent of OpenFlow, SDN technology research institutions at home and abroad have invested a great deal of research effort, such as the deployment of fully controllable and customizable network experiment platform. The programmable routing technology virtualization and the hardware devices of OpenFlow network have made certain progress. The OpenFlow technology research results based on the network virtualization field related were reviewed and compared briefly with the NFV technology. Else, a prospect of the OpenFlow technology application in the future research field and research direction was put forward.

Key words: OpenFlow, software defined network, network virtualization, network experiment platform, network operating system, network functions virtualization

1 引言

随着互联网应用技术的蓬勃发展,网络规模不断扩大,复杂性也越来越高,传统的网络架构已经不能满足用户对网络应用多样化的需求,现有网络体系结构出现了管

理、服务质量、安全性等多方面的问题。传统控制协议/网间协议(TCP/IP)也让各种网络新业务面临最大的挑战,甚至成为网络技术进一步发展的瓶颈。在这种环境下,以云计算技术为代表的新型设计理念为 IT 行业尤其是网络服务形势带来了巨大的变革^[1-3]。SDN (software defined

* 江苏省自然科学基金资助项目(青年基金)(No.BK20130876),中国博士后科学基金第 54 批面上资助项目(No.2013M541702)

network, 软件定义网络)作为下一代 IP 网络架构设计的代表, 在云环境下具有灵活的管控能力, OpenFlow 协议则是实现 SDN 集中管理控制功能的应用实例之一, 基于 OpenFlow/SDN 的可编程网络技术可以解决现有网络可扩展性、可控制性及安全性差的问题。

以 OpenFlow/SDN 为基础架构的网络虚拟化技术, 将物理资源抽象为逻辑上的资源, 并实现控制层与传输层相分离, 提高了网络的灵活性和管理者的自主管控能力。近些年, 计算虚拟化技术以及桌面、存储、网络虚拟化技术都取得了很大的进步, 但在云环境下的网络虚拟化技术还有诸多问题需要解决。伴随着网络虚拟化技术的发展, 以标准化和可控性见长的 OpenFlow/SDN 技术得到了广泛的应用, 并成为近些年各研究机构的热门研究对象^[4-6]。从最初在高校中为诸如科研仿真实验因平台受限提供解决方案, 到 Google、Facebook 宣布其大型网络数据中心均采用 OpenFlow/SDN 技术作为基础技术架构, OpenFlow/SDN 不再是停留在理论阶段的一个研究模型, 正一步步走向大型商业应用并逐步成熟。

本文对 OpenFlow/SDN 在网络虚拟化技术中的应用发展进行剖析, 并将 SDN 与 NFV(network function virtualization, 网络功能虚拟化)技术做简要对比, 最后对 OpenFlow/SDN 的未来发展做出展望。

2 OpenFlow 技术

2.1 OpenFlow 的起源与发展

OpenFlow^[7,8]是斯坦福大学的 Clean Slate 项目组提出的一个开放协议标准, 最早的成员只有斯坦福大学的高性能网络研究组(High Performance Networking Group), 提出了名为 OpenFlow 的网络交换模型, 并于 2008 年在 ACM SIGCOMM 发表了题为“OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks”的论文, 首次详细地介绍了 OpenFlow 的概念^[9,10], 列举了 OpenFlow 最典型的应用, 如校园网络对实验性通信协议的支持、网络管理和访问控制等。目前 OpenFlow 论坛已经成为一个由来自麻省理工学院、加州理工大学等著名高校的教授以及 Deutsche Telekom 等大型电信公司的网络一线工程师等研究者和网络管理者共同组成的开放论坛。

2.2 OpenFlow 关键技术

OpenFlow 网络由 OpenFlow 交换机、Flow-Visor 和控制器 3 部分组成, OpenFlow 交换机负责数据层转发,

Flow-Visor 负责对网络进行虚拟化, 控制器作为控制层实现对网络的集中控制^[11,12]。图 1 为 OpenFlow 交换机的基本组成及与外部控制器的连接。

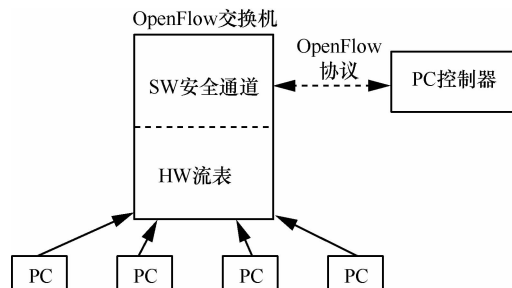


图 1 OpenFlow 基础架构

OpenFlow 交换机是整个 OpenFlow 网络的交换节点, 不是传统网络中的路由器、交换机或者无线 AP, 由流表、安全通道、OpenFlow 协议组成。接收到数据分组后, 在本地的流表中查找转发目标端口, 如果找不到相匹配的端口就会将数据分组转交给控制器处理。从功能强弱上, OpenFlow 交换机分为 OpenFlow-only、OpenFlow-enabled 两种, 前者仅具有 OpenFlow 协议栈, 后者除了具有 OpenFlow 协议栈外, 还支持传统协议栈; 从实现上, 分为硬件实现的 OpenFlow 交换机和软件实现的 OpenFlow 交换机^[13,14]。

流表是 OpenFlow 交换机转发策略控制的核心数据结构, 每个表项都包括分组头域(header field)、活动计数器(counter)、执行行动(action)。交换机通过检测流表表项匹配合适的行为。

- 分组头域: 共包括 12 个域, 涵盖进入接口、目标类型、地址、类型等, 每一个域都有一个确定值。
- 活动计数器: 用来统计表项、发送分组数、查找次数等信息, 可以对表进行维护。
- 执行行动: 又分为必备行动和可选行动, 必备行动是交换机默认支持的, 可选行动需要控制器支持。必备行动是指每个表项都对应 0 个以上的行动, 每个行动的执行按照优先级顺序, 如果没有行动则默认将该数据分组丢弃; 可选行动包括 normal、flood 转发, 入队, 修改域。图 2 为其整体匹配流程。

每个数据分组按照优先级与流表中的表项进行匹配, 如果匹配成功, 活动计数器进行更新并按照优先级执行; 如果匹配不成功, 则转发给控制器。图 3 为分组头解析匹配流程。

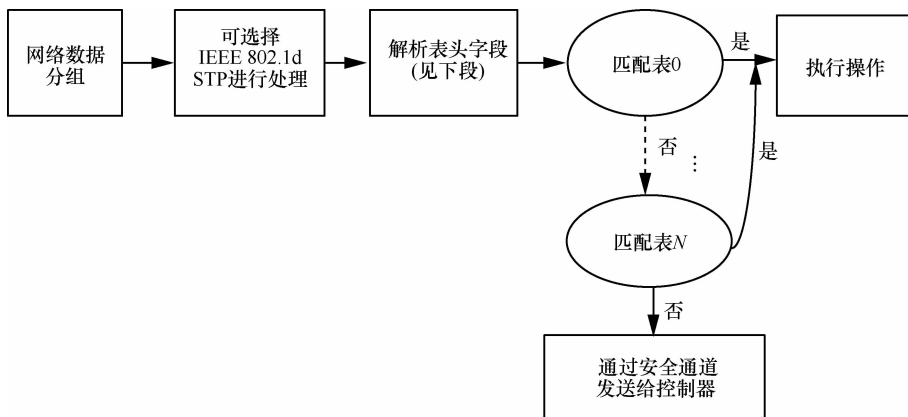


图2 整体匹配流程

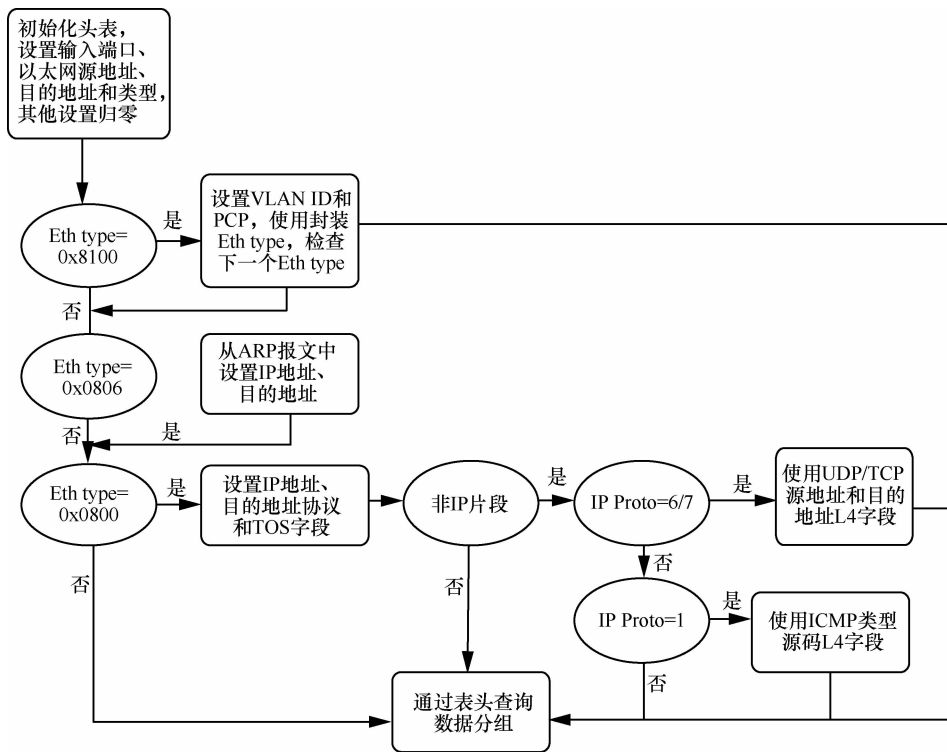


图3 分组头解析匹配流程

安全通道是 OpenFlow 交换机与控制器建立连接、通信的中介,必须要遵循 OpenFlow 协议。OpenFlow 协议支持的消息有 3 种类型:controller/switch 消息、asynchronous 消息、symmetric 消息。

- controller/switch 消息:由控制器发起,用来对交换机进行管理、配置。
- asynchronous 消息:由控制器发给交换机,主要用于通知事件变化等信息。
- symmetric 消息:由交换机或控制器发起,用来建立连接,检测对方是否在线,包括 hello、echo 和

experimenter 3 种消息。

当 OpenFlow 协议通过安全通道连接建立后,双方分别发送携带支持最高版本号的消息给对方,接收方使用两边都支持的最低协议版本进行通信,如果双方的协议版本相同,则建立连接,与此同时活动计数器对数据进行更新;如果不同,则发送 error 消息并断开连接。OpenFlow 还有详细的支持连接中断、加密、生成树的协议。流表的常用修改及 OpenFlow 数据结构可参考 OpenFlow 标准。

2.3 OpenFlow/SDN 目前面临的技术问题

OpenFlow 目前首先需要面对的就是在路由器/交换机

中用作查找的 TCAM 存储器成本问题。在传统设备中为了节约使用成本,根据 MPLS table、MAC、FIB ACL 表匹配字段长度的情况分别进行设计。而在 OpenFlow 设备中,只能通过最大长度的流表代替,与传统设备相比开销增加了 3 倍以上,TCAM 的功耗也大幅增加。因此 OpenFlow 体系需要想办法解决怎样减小流表尺寸的问题。虽然 OpenFlow 最新版本设计出多级流表减少开销,但带来的问题是流量的生成和 TCAM 下维护算法复杂度的增加,目前还没有评测报告。

OpenFlow 通过对流表的转发实现网络通信,这就需要流表能够很准确地将网络中的各种元素抽象出来。流表可以很好地 PrimitiveFlow 和 WorkFlow 抽象,但在有大量用户控制逻辑的边界路由器(如 BRAS、无线网络的 GGSN/PDSN/xGW 等)中,抽象过程还存在很大的问题。在对流表的转发过程中,可以通过修改控制器逻辑支持新的 OpenFlow 协议,但目前还不能很好地对各种现存的接入协议和匹配规则提供支持。

在软件定义网络中,每个节点都需要完成大量的流转发任务,现在还无法对这些控制、转发节点性能进行有效的评估,当 SDN 接到大量流转发申请时可能会遇到“瓶颈”问题,这种突发的大量流转发可能会对网络性能和顽健性产生不利的影响。

3 基于 OpenFlow 技术的应用

3.1 基于 OpenFlow 的网络实验平台技术

随着互联网的发展,现有网络技术面临许多问题,科研人员需要在大规模网络环境中验证这些解决方案是否有效,但现有互联网技术无法满足研究人员的这些需求,研究人员只能在如 NS2、OPNet、Emulab^[15]等网络仿真、模拟平台进行有限的测试。OpenFlow 最初的应用场景就是验证校园网络对实验性通信协议的支持,OpenFlow 具有可控性好、可扩展性强、深度可编程等特点,利用 OpenFlow 技术搭建实验平台正在得到广泛的应用,如 GENI^[16,17]、欧洲的 FIRE、日本的 AKARI 均是以 OpenFlow 为技术基础搭建的网络。

国内具有代表性的是清华大学研究的网络创新环境 TUNIE^[1,18,19],平台包括 OpenFlow 自主研发设备组成的实验网络和管理测量系统。TUNIE 具有以下特点:

- 以 OpenFlow 技术为基础,可以实现网络虚拟化,能够满足科研人员对大规模网络环境的实验需求,

OpenFlow 技术具有可编程、可扩展的特点,可以为研究人员提供异构和编程的实验环境;

- 在对整个实验过程进行跟踪、测控的同时,也可以对整个 TUNIE 平台进行监控管理,使实验得到更好的仿真测试效果;
- 与已有的 FIRE 等技术相比,TUNIE 平台各项技术均是在 OpenFlow 框架体系下统一研发的,不存在兼容性问题,整体设计开发更加完整,实验平台的稳定性、可靠性更高;
- 为了提高深度可编程性,TUNIE 没有完全使用 OpenFlow 交换机作为整个平台结构的核心,而是采取若干 OpenFlow 交换机与可重构路由器相结合的方式,除此之外,还包括无线路由接入器、Wi-Fi 虚拟化节点、可编程集群等。

3.2 基于 OpenFlow 的可编程路由器技术

在整个网络实验平台的研发过程中,为了使平台能够达到支持多个虚拟网络实验并行进行并且运行稳定可靠的效果,基于 OpenFlow 的可编程路由器技术作为整个平台的核心技术起到了至关重要的作用。与传统路由器不同的是,可编程路由器需要满足 3 个最基本的要求:能够将虚拟出的若干个逻辑路由器隔离,并为它们分别提供处理器、缓存等资源而互不干扰;能够灵活地为控制层提供不同接口,并能适用于不同的网络体系;能够同时满足多个流表与数据分组的查询存储需求^[4,20]。

为了满足上述条件,研究人员提出了一种支持可编程虚拟化的路由器平台——PEARL。为使可编程路由器平台能够分别提供处理器并能够互相隔离,PEARL 分别从软件和硬件方面着手。软件方面,采用 LXC 内核虚拟化技术将进程和资源进行隔离,把不同的资源分别划分为相对独立的组并保持它们的需求平衡;硬件方面,由硬件数据分组处理卡对虚拟路由器资源进行配置。在可扩展性方面,PEARL 提供了高优先级和低优先级两种虚拟路由器,分别为相对复杂和相对简单的网络应用提供服务,同时支持用户根据需求进行编程或者直接调用数据分组。由于采用了 LXC 轻量级虚拟化技术,在数据分组和流表的查询存储方面,PEARL 有更高的效率^[21-23]。

在完成节点虚拟化、链路虚拟化以及虚拟资源的映射分配等关键技术之后,TUNIE 实现了多资源簇的初步部署,已经能够为网络新协议、架构提供实验平台,随着平台的进一步完善,TUNIE 必定会得到更广泛的应用。



3.3 基于 OpenFlow 交换机的网络操作系统

早期的计算机程序开发人员需要使用机器语言编程,直接对最底层的物理资源进行管理,使得程序的编写、调试非常不便。操作系统的出现改变了以往的状况,抽象出的平台及平台提供的各项接口为计算机的管理及程序开发提供了极大的方便。现代的网络管理面临着与早期计算机管理类似的难题,网络操作系统 NOX 的出现旨在为用户提供抽象的与底层部件(路由器、交换机)交互的平台,并为网络管理者提供接口,使得网络管理的效率更高。

OpenFlow 实现了网络控制层和转发层的相互分离,在 NOX 中,OpenFlow 交换机负责转发层各项数据的转发,控制器则通过 OpenFlow 协议提供的接口对整个网络进行集中控制,而 NOX 本身并不对网络负有管理任务。NOX 作为平台,针对的对象是流,由于 NOX 向上层的应用开发者提供易用的开发接口,每一个新建的流都经由 OpenFlow 交换机直接转交给相应的应用处理,当流经过 OpenFlow 交换机找不到匹配的表项时,转发到 NOX 平台上的控制器,控制器与 NOX 上的应用通过流量信息等决策流的行为。

3.4 Google 数据中心网络与 IBM/NEC OpenFlow 10GBE 交换机和 SDN 方案

Google 作为世界上最大的网络服务提供商,拥有海量的用户级别。为了改进自身的网络,Google 在 2012 开放网络基金会(Open Networking Foundation)上正式宣布使用 OpenFlow 技术作为下一代网络架构。Google 有一个在全球范围内为用户提供搜索、Youtube、Gmail 等服务的网络,还有一条连接各个数据中心的内部网络。这些海量的数据流在网络中的传输有着不规则性,且需要根据不同的优先级对数据流的传输进行调控。传统的网络架构使 Google 在这方面耗费了大量的人力物力,现在采用 OpenFlow/SDN 技术将整个网络的数据转发与控制相分离,通过软件技术对数据流的管控进行优化,并对整个网络的负载进行调控。目前 OpenFlow/SDN 技术已经为 Google 网络服务效率带来了 2~3 倍的提升,未来技术的不断改进会使网络运营更加高效。

随着 OpenFlow 在商业上的成功运用,市场上有一些网络供应商已经推出了 OpenFlow/SDN 产品。一些大型的网络公司及 IT 设备商也开始投入 OpenFlow 的研发中。IBM 是开放网络基金会的初始成员,也是第一家采用 10 GBE (Gigabit Ethernet) OpenFlow 交换机技术的机构。IBM 联合 NEC 推出了由基于 OpenFlow 的 IBM BNT Rack Switch G8264

和 NEC 的 ProgrammableFlow 控制器组成的解决方案,企业可以通过 IBM OpenFlow 交换机和 NEC 的控制器构建一个完整的数据中心网络^[24,25]。

4 基于 OpenFlow 的云环境下的网络虚拟化技术

在应用中,网络虚拟化分为网络外部虚拟化和网络内部虚拟化。外部虚拟化是指通过对网络中的交换机、网络端口、路由器及其他物理元素进行抽象,使得有不同需求的用户组可以访问同一个物理网络,甚至将多个物理网络整合为更大的逻辑网络;内部虚拟化则是在虚拟的服务器内部通过定义逻辑交换机建立一个或多个逻辑网络。为了使用户能够快速安全地访问应用程序和数据,虚拟网络从逻辑上对不同的用户组进行一定的隔离。网络虚拟化技术使单一物理设备实现了多用户组的同时部署,并且使整个网络的可控制性、可扩展性、安全性都很高。云计算环境下的网络虚拟技术体系如图 4 所示。

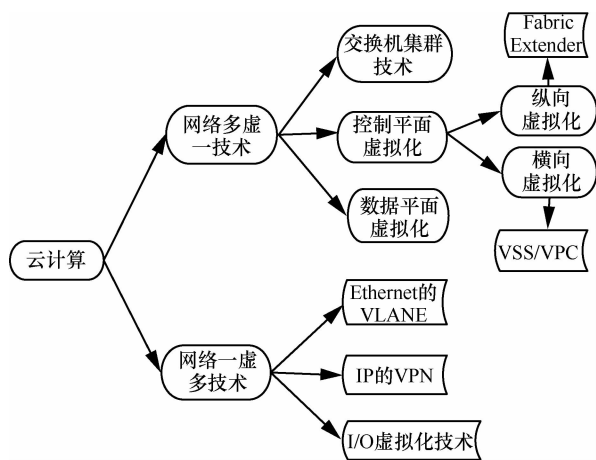


图 4 云计算环境下的网络虚拟技术体系

5 SDN 与 NFV 关系

OpenFlow/SDN 技术的推广面临的一个主要问题是无法与现有网络设备兼容,这也是困扰传统网络的一大难题。运营商网络往往需要大量的各种专有硬件设备,如果启动新的网络服务,原有设备的兼容性及可扩展性严重制约这些服务的正常运营;再加上能源、投资以及关键技术研究的挑战,这些设备的运营变得日益困难。由于这些硬件设备很快达到使用寿命,重复的设计、采购、集成、部署使用户很难从中受益。更糟糕的是,随着各种新型网络服务技术的创新,原有设备由于技术过时迅速遭到淘汰,严重制约现有网

络技术的发展。NFV,旨在通过改进标准的IT虚拟化技术,增强标准大容量服务器、交换机和存储器等网络设备,改变网络运营的联网方式,这些网络设备可能位于数据中心、网络节点和终端用户所在地,涉及网络中软件功能的实现,并可以在标准的服务器硬件环境中运行^[26-28]。

NFV与SDN有很强的互补性,但又不相互依赖,NFV可以在没有SDN的情况下实现,但将二者结合会有更大的潜能和更为广阔的应用前景。依靠SDN提出的数据转发控制方法,能够提高性能以及和现有已部署设备的兼容性,便于对程序进行维护操作。NFV可以为SDN软件运行提供基础平台,还可以提供与SDN相适应的商业服务器和交换机^[29-31]。

NFV与SDN的关系如图5所示。其中,开放创新,由第三方用户创建更有竞争力的创新应用程序;SDN,创建能够更快创新的抽象网络环境;NFV,减少CAPEX、OPEX空间和资源消耗。

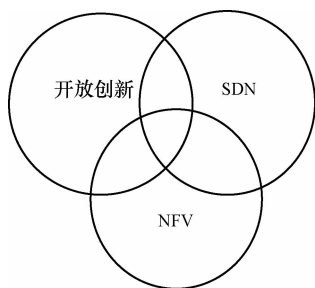


图5 SDN与NFV技术的关系

6 结束语

云计算的诞生意味着网络资源的存储、计算都向着虚拟化、动态化方向发展,在基础网络设施中如何使虚拟网络快速适应物理资源的调配和网络负载变化,并为工作负载提供稳定的网络资源响应成为网络虚拟化面临的主要问题。基于OpenFlow的SDN通过对底层网络物理层进行抽象,实现了控制层与转发层相分离,从而为解决这一问题提供了可能。OpenFlow/SDN并不是一项具有革命性的新技术,但具有未来网络发展方向的几大特点:简单、易行、可扩展性、兼容性。随着OpenFlow技术的不断发展,其已经在诸如网络实验平台、可编程路由器技术、NOX中得到了应用与验证。

OpenFlow/SDN给现有网络体系带来了巨大的冲击,从根本上取代了传统API控制网络硬件设备的模式,除了能让管理员更方便地对网络进行管理外,还能减少整

个网络对传统硬件设备需求的依赖。该技术还处于创新验证阶段,在应用上还不够完善,目前最成功的案例就是以OpenFlow/SDN为基础技术架构的Google数据中心网络。OpenFlow面临诸如无法与现有网络基础设备兼容、协议尚不成熟、可替代性、高容错控制器等挑战,但随着技术的不断创新和完善,以开放性、可扩展性见长的OpenFlow/SDN将会成为下一代运营商网络的重要技术架构。

从现有网络向SDN/NFV转变将会是一个漫长而又充满挑战的过程,OpenFlow/SDN技术必然会在以云计算为基础的网络虚拟化体系中得到更广阔的发展空间。

参考文献

- 1 周焯,李勇,王芳等.基于OpenFlow的网络实验平台技术.清华大学学报(自然科学版),2012,52(11):1540~1544
- 2 周焯,李勇,苏厉等.基于虚拟化的网络创新实验环境研究.电子学报,2012(40):2152~2157
- 3 林闯,贾子骁,孟坤.自适应的未来网络体系架构.计算机学报,2012,35(406):1077~1093
- 4 郭春梅,张如辉,毕学尧.SDN网络技术及其安全性研究.信息安全,2012,14(8):112~114
- 5 Sachin S, Dimitri S, Didier C, *et al.* Enabling fast failure recovery in OpenFlow networks. Proceedings of 2011 8th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN), Krakow, 2011
- 6 Emulab-network emulation testbed home. <http://www.emulab.net/>, 2011
- 7 ICHINO Kiyohisa (NEC Corporation). OpenFlow Communications System and OpenFlow Communication Method, European Patent Application, Jan 2012
- 8 GENI: global environment for network innovations. <http://www.geni.net/>, 2011
- 9 TUNIE: enabling network innovation. <http://fi.ee.tsinghua.edu.cn:8080/myweb/>, 2011
- 10 Wroclawskij. GENI: Global Environment for Network Innovations. Using the Component and Aggregate Abstractions in the GENI Architecture, GDD-06-42, 2006
- 11 Touch J, Perlman R. Transparent Interconnection of Lots of Links (TRILL): Problem and Applicability Statement. IETF RFC 5556, 2009
- 12 Chu Y H, Chen Y T, Chou Y C, *et al.* A simplified cloud computing network architecture using future internet technologies. Proceedings of Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Asia-Pacific, 2011: 1~4
- 13 Kanaumi Y, Saito S, Kawai E, *et al.* Deployment and operation of wide-area hybrid OpenFlow networks. Proceedings of Network Operations and Management Symposium (NOMS), Hawaii, USA, 2012: 1135~1142



- 14 Open Networking Foundation. Software-defined networking: the new norm for networks. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloadswhite-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>, 2012
- 15 OpenFlow. <http://www.openflow.org/>, 2013
- 16 NOX. NOX Introduction. <http://noxrepo.org/noxwiki/>, 2013
- 17 Sachin S, Dimitri S, Didier C. OpenFlow: meeting carrier-grade recovery requirements. *Computer Communications*, 2013, 36 (6): 656~665
- 18 Zhang J W, Zhang J, Zhao Y L, *et al.* Experimental demonstration of OpenFlow-based control plane for elastic lightpath provisioning in Flexi-Grid optical networks. *Optics Express*, 2013, 21(2):1364~1373
- 19 Liu L, Takehiro T, Itsuro M, *et al.* Experimental validation and performance evaluation of OpenFlow-based wavelength path control in transparent optical networks. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26578~26593
- 20 Siamak A, Reza N, Eduard E, *et al.* Integrated OpenFlow-GMPLS control plane: an overlay model for software defined packet over optical networks. *Optics Express*, 2011, 19(26):421~428
- 21 Jocha D, Kern A. Controller Driven OAM for OpenFlow, Patent Cooperation Treaty Application.W02013008134 A2, Jan 2013
- 22 Nicola B M, Andrea D, Giacomo M, *et al.* Information centric networking over SDN and OpenFlow: architectural aspects and experiments on the OFELIA testbed. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2013.07.031>, Jan 2013
- 23 Sharma S, Staessens D, Colle D, *et al.* Enabling fast failure recovery in OpenFlow networks. *Proceedings of IEEE Conference on Design of Reliable Communication Networks, Krakow, Poland*, 2011:164~171
- 24 Staessens D, Sharma S, Colle D, *et al.* Software defined networking: meeting carrier grade requirements. *Proceedings of IEEE Conference on Local & Metropolitan Area Networks, North Carolina, USA*, 2011:1~6
- 25 OpenFlow Switch Specification: Version 1.1.0, 2011
- 26 Kempf J, Nilsson L H. Implementing EPC in a cloud computer with OpenFlow data plane. Patent Cooperation Treaty Application, 2012(11)
- 27 Abhishek C, Cedric W. ContentFlow: mapping content to flows in software defined networks. *Computer Science*, 2013(2)
- 28 Rodríguez G, Lluís M. Mesura de Consum de Dispositius de Xarxa, Mar 2012
- 29 Farhan H M, Massimo T, Ferhat D, *et al.* Disaster survivability in optical communication networks. *Computer Communications*, 2013, 36(6):630~644
- 30 Global Environment for Networking Innovations (GENI): Establishing the GENI Project Office (GPO) (GENI/GPO) NSF06601, May 2012
- 31 Nidhi T. A comparative performance analysis of GENI control framework aggregates. <http://krex.k-state.edu/dspace/handle/2097/3716>

[作者简介]



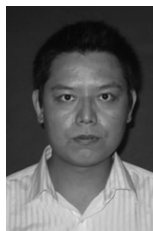
管红光,男,华为技术有限公司南京研究所电子信息类高级工程师、系统架构师,主要研究方向为宽带及网络产品。



杨宜镇,男,华为技术有限公司南京研究所电子信息类高级工程师、系统架构师,主要研究方向为宽带及网络产品。



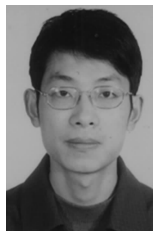
任万里,男,河南大学硕士研究生,主要研究方向为 SDN。



韩志杰,男,博士,河南大学副教授,主要研究方向为 SDN 和虚拟化。



季一木,男,博士,南京邮电大学副教授,主要研究方向为 SDN 和虚拟化。



孙雁飞,男,博士,南京邮电大学研究员,主要研究方向为 SDN 和虚拟化。

(收稿日期:2013-08-12)