第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊
工信部优秀科技期刊 | 中国五大文献数据库收录期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

中兴通讯技术
ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2013年10月 • 第5期

专题：软件定义网络

ISSN 1009-6868
10>
9 771009 686007

中兴通讯技术 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL 二〇一三年十月 第十九卷第五期 总第一一二期

目次

中兴通讯技术　总第112期　第19卷　第5期　2013年10月

专题：软件定义网络

02 SDN标准化和应用场景探讨 …… 王茜，赵慧玲，解云鹏
06 软件定义网络与FINE …… 毕军，胡虹雨，姚广，冯涛
11 软件定义网络架构研究与实践 …… 兰巨龙，莫涵，胡宇翔
16 一种面向多样化网络业务融合的SDN网络架构 …… 龚向阳，王文东
22 对软件定义网络数据面抽象的重新思考 …… 孙志刚，吕高锋，陈一骄
27 软件定义网络技术及其在移动通信网中的应用 …… 段晓东，于青，曹振，李晨
32 基于软件定义的弹性智能边缘网络 …… 唐雄燕，周光涛，朱鹏
38 软件定义网络关键技术及其实现 …… 汪军

专家视点

43 对SDN发展的探索 …… 蒋林涛

运营应用

47 基于翻译的IPv6过渡关键技术及部署 …… 蔡广平，钟炜

研究论文

52 合同能源管理的方案和盈利模式研究 …… 许璐，李兆伟，刘丽伟

开发园地

56 基于无线网络性能数据的用户业务行为分类与感知评估技术 …… 李良斌，罗旭耀

系列讲座

61 近场通信技术(2) …… 孙成丹，彭木根

综合信息

工信部确立2018年两化深度融合目标 全国两化融合发展水平指数达82 (26)　中国光通信器件行业现状堪忧 专家建言政府应加大扶持 (37)　中国通信设备业1—7月 完成固定资产投资466亿元(41)　中兴通讯光网络增长创新高 稳居全球第二 (46)　中国光纤敷设超过6亿芯千米 接入覆盖用户过亿 (65)

办刊宗旨

以人为本，荟萃通信技术领域精英；
迎接挑战，把握世界通信技术动态；
立即行动，求解通信发展疑难课题；
励精图治，促进民族信息产业崛起。

期刊基本参数：CN 34-1228/TN* 1995* b* 16* 64* zh* P* ¥20.00* 15000* 13* 2013-10

Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol.19 No.5 Oct. 2013

Special Topic: Software-Defined Networks

02 Standardization and Deployment of SDN …… WANG Qian, ZHAO Huiling, XIE Yunpeng

06 Software-Defined Networks and FINE …… BI Jun, HU Hongyu, YAO Guang, FENG Tao

11 SDN Architecture: Research and Practice …… LAN Julong, MO Han, HU Yuxiang

16 SDN Infrastructure for Converging of Diverse Network Services …… GONG Xiangyang, WANG Wendong

22 Data Plane Abstraction in Software-Defined Networks …… SUN Zhigang, LV Gaofeng, CHEN Yijiao

27 SDN in Mobile Networks …… DUAN Xiaodong, YU Qing, CAO Zhen, LI Chen

32 An Elastic Smart Edge Network Based on SDN …… TANG Xiongyan, ZHOU Guangtao, ZHU Peng

38 Software-Defined Networks: Implementation and Key Technology …… WANG Jun

Expert View

43 Exploration of SDN Development …… JIANG Lintao

Operational Application

47 Key Technologies for Translation-Based IPv6 Transitions …… CAI Guangping, ZHONG Wei

Research Paper

52 Energy Performance Contracting: Solutions and Profit Models …… XU Lu, LI Zhaowei, LIU Liwei

Development Field

56 Classifying and Evaluating Perceptions of User Services: A Technique Based on Wireless Network Performance …… LI Liangbin, LUO Xuyao

Lecture Series

61 Near Field Communication Technology (2) …… SUN Chengdan, PENG Mugen

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权，包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权，所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可，不得以任何形式全文转载本刊内容；如部分引用本刊内容，须注明该内容出自本刊。

邮购须知

本刊常年办理邮购订阅业务，欢迎订阅。订阅方法：从邮局汇款至编辑部，在汇款单上将订阅者的详细地址、收件人姓名及联系电话填写清楚，并在汇款单附言栏注明所购杂志期次及数量。

专题：软件定义网络

专|题|导|读

互联网的广泛普及正在不断地改变着人们的生产、生活和学习方式，并已成为支撑现代社会发展以及技术进步的重要基础设施之一。传统的互联网是由终端、服务器、交换机、路由器以及其他设备组成，这些网络设备使用着封闭、专有的内部接口，运行着大量的分布式协议。然而，传统的互联网在成为一个复杂巨系统的同时，其网络架构和服务也越来越无法满足当今用户、企业和服务提供商的需求。在这种网络环境中，网络创新十分困难，研究人员不能部署和验证他们的新想法；网络运营商难以针对其需求定制并优化网络；网络设备商也无法及时地创新以满足用户的需求。

软件定义网络（SDN）是指从 OpenFlow 发展而来的一种新型的网络架构，这种技术的初衷是期望研究人员能够在校园网上进行新型协议的部署试验，并由此诞生了 OpenFlow 协议。随后，该概念被逐渐扩展成为软件定义网络，其核心理念是使网络软件化，使网络能力充分开放，从而使得网络能够像软件一样便捷、灵活，提高网络的创新能力。

虽然当前学术界、工业界对 SDN 的确切定义还没有明确和统一，SDN 的具体实现和部署技术也还在不断演进之中，但基于 SDN 技术打造和部署创新型网络的共识正在逐渐形成，并开始在多种应用场合得到了部署和应用，SDN 的概念正在从学校实验室里的实验新型协议逐渐地发展演化成为软硬件解藕、控制转发分离的网络能力软件化的新型的网络体系架构。

本期专题主要向各位读者介绍了中国研究机构和运营商相关技术专家对 SDN 和网络演进技术的一些思考，内容包括了 SDN 技术与网络体系架构、SDN 技术标准化进展、SDN 技术在网络演进中的研究成果、SDN 技术的网络应用和实施的思考等，并邀请蒋林涛先生在专家视点栏目发表了对 SDN 发展的个人观点。这些论文凝聚了各位专家作者的研究成果和工作经验，希望能给本期读者带来有益的启示与参考。在此，对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢！

王文东

2013 年 7 月 20 日

本期专题策划人

王文东

北京邮电大学网络技术研究院副院长，中国计算机学会、中国通信学会高级会员，北京通信学会理事，国务院“政府特殊津贴”获得者；曾获国家科技攻关重大成果奖、省部级科技进步奖多项；当前的主要研究领域为未来互联网体系结构和关键机制、网络及业务的服务质量控制与管理技术；主持国家科技攻关重点项目、国家“973”项目课题、国家自然基金项目、国家“863”项目和国际合作项目多项；近年来发表 SCI、EI 检索论文 160 余篇，持有国际发明专利和中国发明专利 20 余项。

2013 年第 1—6 期专题计划

1. 自组织网络技术与应用
   陈前斌 重庆邮电大学通信与信息工程学院院长
2. 下一代互联网与 IPv6 技术演进
   崔勇 清华大学计算机系网络所副所长
3. 单波长太比特以上超高速光通信系统技术与器件
   张成良 中国电信北京研究院副总工
4. 大数据技术与应用
   刘鹏 解放军理工大学教授
5. 软件定义网络
   王文东 北京邮电大学网络技术研究院副院长
6. 移动互联网的发展趋势和技术方向
   蒋林涛 工信部电信研究院科技委主任

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.001
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130830.1449.001.html

SDN标准化和应用场景探讨

Standardization and Deployment of SDN

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0002-004

王茜/WANG Qian
赵慧玲/ZHAO Huiling
解云鹏/XIE Yunpeng
（中国电信股份有限公司北京研究院，北京 100035）
(China Telecom Corporation Limited Beijing Research Institute, Beijing 100035, China)

摘要： 认为软件定义网络（SDN）是支持控制和转发分离、可编程的开放接口的网络技术，可以支持更灵活的网络控制和业务能力提供。综合SDN在开放网络基金会（ONF）、因特网工程任务组（IETF）、国际电信联盟（ITU）、欧洲电信标准协会（ETSI）标准化的进展情况，指出可能引入SDN的场景在数据中心、城域骨干网、接入网等层面，并探讨了在这些场景引入SDN存在的技术难点。

关键词： 软件定义网络；控制转发分离；网络功能虚拟化

Abstract: Software-defined networking involves separate control and forwarding as well as a programmable open interface. SDN allows for more network flexibility and greater business adaptability. In this paper, we discuss current SDN standardization taking place at ONF, IETF, ITU, and ETSI. We highlight the possible uses of SDN in the data center, metro backbone network, and access network, and we discuss related technical difficulties.

Keywords: software-defined networks; decoupled control and data planes; network function virtualization

从2012年开始，由斯坦福大学主导提出的软件定义网络（SDN）技术的发展受到了越来越多的研发人员、运营商、互联网企业以及设备提供商的关注。尤其是Google在数据中心间基于SDN技术组网的商用案例，使得原被认为仍在学术研究阶段的SDN架构变成了可以落地实践的组网解决方案。同时，随着信息技术的快速发展和用户需求的不断变化，尤其是移动互联网、云计算和物联网等新技术的出现，虽然创造出新的产品、服务和商业模式，但也给通信网络带来了新的需求和挑战，对通信网络的设备能力和管理复杂度也提出更高要求。通信网络需要进一步简化运维、挖掘网络潜能、提供快速灵活的业务支持能力。

SDN具有控制和转发分离、可编程的应用编程接口（API）的技术特点，可以支持应用层与网络层更好的协同机制，支持网络资源的虚拟化管理和集中控制。

目前多个标准组织都在开展SDN技术相关标准的制订工作，包括开放网络基金会（ONF）、因特网工程任务组（IETF）、国际电信联盟（ITU）、欧洲电信标准协会（ETSI）NFV组等，但是各标准组织站在各自不同的出发点进行研究，其标准化的进展各有侧重。本文从SDN的概念和技术特征出发，跟踪了SDN技术目前的标准化进展，并与业务需求相结合，对网络中引入SDN技术的场景进行了探讨。

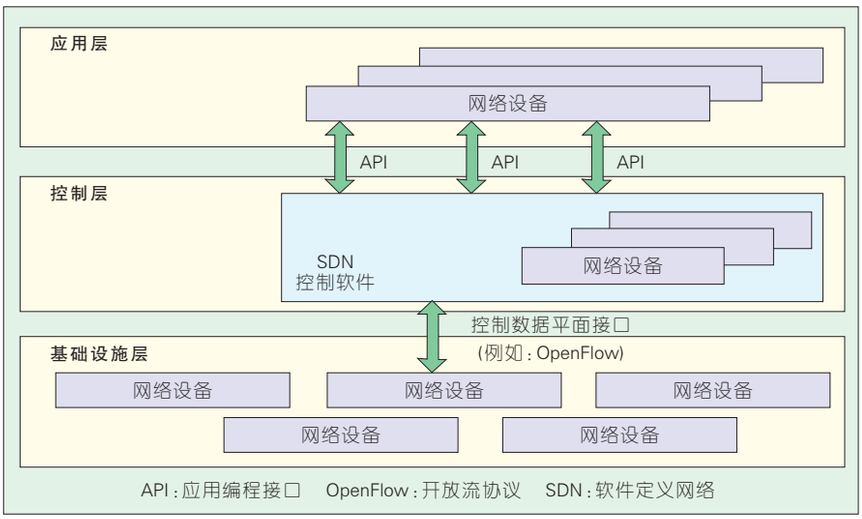
收稿日期：2013-05-06
网络出版时间：2013-08-30
基金项目：国家高技术研究发展（“863”）计划（2011AA01A110）

1 SDN标准化进展

1.1 SDN的概念和主要特征

SDN是一种新型网络技术，在实现网络控制与转发能力分离的基础上，使得转发能力可以直接编程进行控制。这种原来与网络设备紧密耦合的控制能力，通过可编程的方式调用底层设施能力的抽象描述，以便将网络能力看成逻辑分离或者虚拟化的子网以支持多种用户或应用的不同需求。按照行业研究领域对SDN的定义，SDN[1-2]分为3个层面：即应用层、控制层和基础设施层。基于SDN的分层架构如图1所示。

应用层（AL）包括各种不同的业务和应用，可以管理和控制网络对应用转发/处理的策略，也支持对网络属性的配置实现提升网络利用率、保障特定应用的安全和服务质量；控制层（也称为网络操作系统（NOS））主要负责处理数据转发面资源的抽象信息，可支持网络拓扑、状态信息的汇总和维护，并基于应用的控制来调用不同的转发面资源；基础设施层（数据转发层）负责基于业务的流表



▲图1 基于SDN的分层架构

的数据处理、转发和状态收集，原有网络中转发面功能在分离的网络设备中实现，而支持SDN的网络中这些功能可以在同样的网络设备中通过融合实现，由控制层的可编程接口进行调用。

SDN的主要特征包括3个方面：

（1）网络资源虚拟化

支持逻辑网络和物理网络分离，逻辑网络可以根据业务需要配置、迁移，不受物理位置的限制。

（2）网络控制集中化

支持网络资源的集中控制，使得全局优化成为可能，比如流量工程、负载均衡。支持整个网络当作一台设备进行维护，设备零配置即插即用，大大降低运维成本。

（3）网络能力开放化

应用和网络的无缝集成，应用告诉网络如何运行才能更好地满足应用的需求，比如业务的带宽、时延需求，路由的成本等。

1.2 SDN在ONF的标准化进展

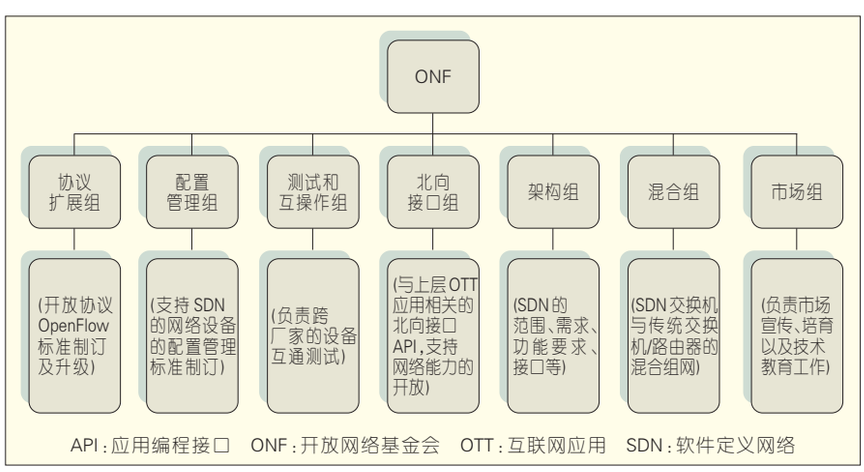
2011年，在雅虎、谷歌、德国电信等几家公司的倡议下，开放网络基金会（ONF）成立，其致力于软件定义网络及其核心技术OpenFlow的标准化（规范制订）以及商业化。ONF的成员由董事会成员及普通会员两部分组成，董事会成员包括德国电信、日本NTT电信、Facebook、谷歌、微软、Verizon、雅虎以及知名投行高盛公司等8家成员；会员则包括网络设备商、网络运营商、服务器虚拟化厂商、网络虚拟化厂商、芯片商、测试仪表厂商等在内的80多家成员。

ONF组织架构如图2所示。组织架构包括扩展性组、配置和管理组、测试和互操作组、混合模式组、市场培育组、架构组、转发抽象组、北向API组等7个工作组。ONF根据对SDN技术方案的研究成果，不定期发布技术报告、技术白皮书以及相关的标准规范制订和维护。目前发布的ONF主要研究成果包括：SDN白皮书、OpenFlow标准1.3[3]和OpenFlow配置管理协议（OF-CONFIG）版本1.1[4]。

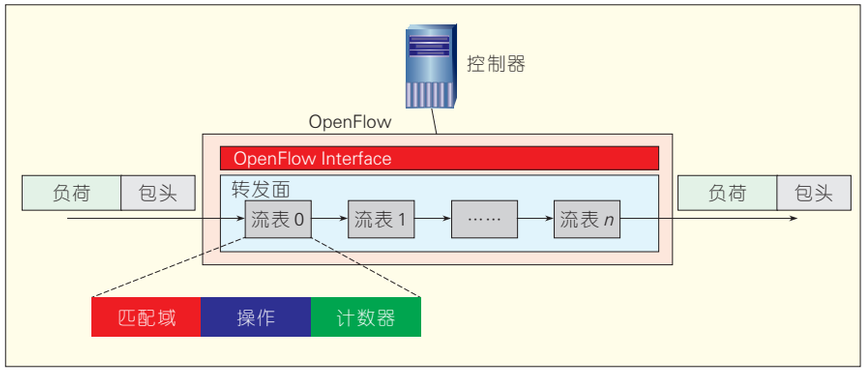
OpenFlow 1.3于2012年4月发布，主要针对SDN的基础设施层的转发面抽象模型进行了定义，将网络中的转发面设备抽象为一个由多级流表驱动的转发模型。OpenFlow多级流表转发模型如图3所示。

在转发模型中有两个过程尤为重要，即生成策略和执行操作。其中，操作决定了OpenFlow对转发面行为的抽象能力，可以在流表中进行查询调用。标准定义的操作包括修改报文头部各个字段值、封装/去封装、生存时间（TTL）值复制、输出到一个端口或一组端口、洪泛到所有端口等。当操作流程比较复杂时，可以迭代查询多次流表来实现，在生成策略的过程中也可能调用执行操作。

OpenFlow配置和管理协议（OF-CONFIG）由控制和管理工作组制订和维护，是OpenFlow协议的同伴协议，目前采用NETCONF协议进行传输。2012年1月，ONF发布了OF-CONFIG 1.0版，定义了配置OpenFlow数据路径所需的一些基本功能，包括一个或多个OpenFlow控制器的分配、队列和端口的配置、远程更改端口属性等功能。2012年6月，ONF发布了OF-CONFIG 1.1版，新增了OpenFlow逻辑交换机与控制器之间安全通信的证书配置、OpenFlow逻



▲图2 ONF组织结构图



▲图 3 OpenFlow 多级流表转发模型

辑交换机的能力发现以及 IP-in-GRE、NV-GRE、VxLAN 隧道的配置等功能。

ONF 的其他工作组还正在研究、制订其他方面的标准。测试和互操作工作组正在制订认证、互操作和基准测试规范和测试套件。结构和框架工作组致力于定义 SDN 的范围，研究 SDN 结构的需求和问题、框架的组件、转发控制管理的功能模块。混合模式工作组主要研究混合模式的交换架构。

1.3 SDN 在 IETF 的标准化进展

早在 SDN 提出之前，IETF 就对很多类似 SDN 的核心理念和技术进行了探索研究，与 ONF 相比较，IETF 的相关工作更多的是由网络设备厂商主导，聚焦于 SDN 相关功能和技术如何在网络中实现的细节上。

IETF 转发与控制分离工作组（ForCES）的目标是定义一种架构和相关机制，用于在逻辑上分离的控制平面和转发平面之间交互信息，实际上是定义了 SDN 中转发与控制分离的一种可行的实现机制。该工作组从 2003 年至今共发布了 9 篇 RFC 文稿，内容涉及需求、框架、协议、转发单元模型以及管理信息库（MIB）等多个领域。

在 IETF 第 84 次、85 次会议期间，IETF 成立了路由领域公开的研究组，重点研究路由系统接口（I2RS）的问题描述、需求、应用场景和架构模型等。I2RS 主张在现有的网络层协议基础上，增加插件，并在网络与应用层之间增加 SDN 业务编排层（SDN Orchestrator）进行能力开放的封装，而不是直接采用 OpenFlow 进行能力开放，目的是尽量保留和重用现有的各种路由协议和 IP 网络技术。I2RS 的研究草案显示的支持 SDN 体系架构如图 4 所示。

1.4 SDN 在 ITU 的标准化进展

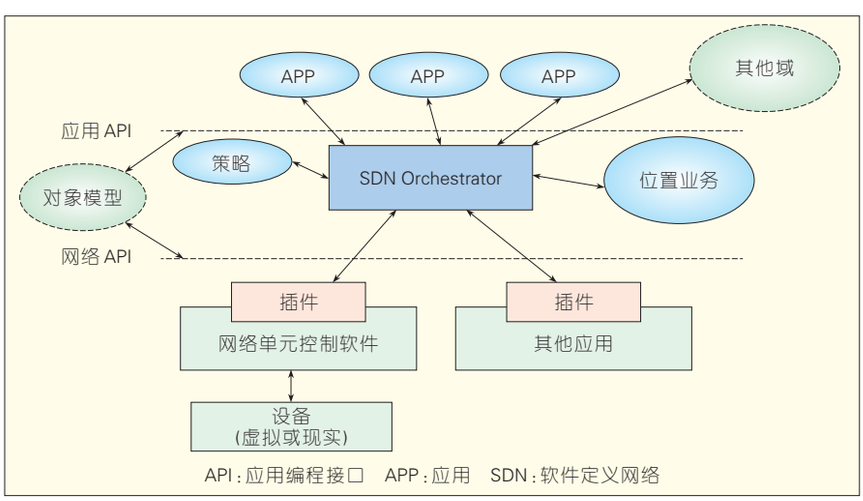
ITU-T 在 2012 年上一个研究期末就开始了对 SDN 的跟踪研究，首先由 SG13 的 Q21 开始，成立了 Y.FNsdn-fm 和 Y.FNsdn 两个项目，分别对应 SDN 的需求和架构研究，并初步提出了 SDN 的实现架构。经过与 ONF 的联络协商，ITU-T 更加明确了自身研究的 SDN 场景对象、相关的架构是针对运营商网络中引入 SDN 技术的标准。

2013 年 2 月的 ITU 会议上，SG13 的工作组召开了多次联合会议，对于 SG13 如何开展 SDN 的需求和架构进行了深入讨论。其中未来网络组负责 SDN 通用功能以及功能实体的标准制订，并研究在未来网络中应用 SDN 的需求；NGN 演进的网络（NGN-e）组重点研究 SDN 在现有网络中的应用场景和功能需求；云计算网络组侧重研究云计算网络中 SDN 的应用场景和功能需求。其中，由中国电信等运营商主导的 NGN 演进网络组立项了智能型网络与 SDN 技术结合的 S-NICE 标准研究，推动了 NGN 网络中 SDN 体系标准的制订，也为通信网络中如何引入 SDN 技术奠定了基础。

同期，SG11 工作组也开始讨论 SDN 信令需求和框架的研究工作，并与 SG13 协商明确 SG11 侧重对 SDN 信令需求、信令参考架构、信令的实现机制和协议，协议兼容性测试等标准的制订，并在 2013 年 2 月会议上启动了对 BNG、BAN、IPv6 过渡技术中引入 SDN 的信令需求的新标准研究。

1.5 SDN 在 ETSI NFV 的标准化进展

2012 年 10 月，由 AT&T、英国电信 BT、德国电信、Orange 等 7 家运营商在欧洲电信标准协会（ETSI）发起成



▲图 4 IETF 支持 SDN 的 I2RS 架构

立了一个新的网络功能虚拟化标准工作组(NFV)[5]。NFV工作组的研究主要是希望发展标准的IT虚拟化技术,使得多种类型的网络设备能够融入到符合行业标准的大量服务器、交换机和存储设备中去,包括在一系列行业标准服务器硬件上运行的软件中执行网络功能,从而可以根据业务需要在网络中的不同位置硬件上安装和卸载所需要的任何软件功能,加快网络部署的进度,降低业务部署的复杂度,提高网络设备的统一化、通用化、适配性等,最终降低网络的建设成本和维护成本。

NFV的第一次会议已于2013年1月召开,明确了NFV将制订支持这些虚拟功能硬件和软件基础设施的要求和架构规范以及发展网络功能的指南,第一批规范将于2013年底制订前完成。

2 网络中SDN技术应用场景探讨

2.1 SDN在网络中可能的应用场景

与现有网络相比较,尤其是具有代表性的互联网网络,SDN技术可以增强控制层的智能边缘转发能力、骨干网络的高效承载能力以及网络能力的开放和协同,因此可能引入SDN的场景在于云数据中心[6-7]、城域骨干网层面、接入网层面等。

(1)数据中心场景

通过引入SDN技术,在数据中心物理网络基础上对不同的数据中心资源进行虚拟化,单个数据中心的网络能力可以合成为一个统一的网络能力池,从而缓解大规模云数据中心在承载多租户的业务时面临的扩展性、灵活性问题,提升了网络的集约化运营能力,实现了数据中心间组网方案的智能化承载。

可能的解决方案为在数据中心出口部署支持SDN技术的路由器设备,可实时监控链路的带宽利用率和应用的流量,并将监控结果提交给数据中心控制器。数据中心控制器集中控制各个数据中心出口的路由器设备,统一调配多个数据中心出口的链路和业务的流量流向,使得链路资源可根据当前的业务需求和链路情况进行调整,提升链路带宽资源的利用率。

(2)城域骨干网场景

城域骨干网中,边缘控制设备(如宽带接入服务器(BRAS)和业务路由器(SR))是用户和业务接入的核心控制单元,不仅具备丰富的用户侧接口和网络侧接口,也实现业务/用户接入到骨干网络的信息交换等功能。边缘控制设备维护了用户相关的业务属性、配置及状态,如用户的IP地址、路由寻址的邻接表、动态主机配置协议(DHCP)地址绑定表、组播加入状态、PPPoE/IPoE会话、QoS和访问控制列表(ACL)属性等,这些重要的表项和属性直接关系到用户的服务质量和体验。

基于SDN技术,可以将边缘的接入控制设备中路由转发之外的功能都提升到城域网控制器中实现,并可以采用虚拟化的方式实现业务的灵活快速部署。

在此场景中,网络控制器需要支持各种远端设备的自动发现和注册,支持远端节点与主控节点间的保活(Keep Alive)功能,并能够将统筹规划之后的策略下发给相应的远端设备进行转发,包括IP地址、基本路由协议参数、MPLS/VPN封装参数、QoS策略、ACL策略等,而边缘的接入控制设备只实现用户接入的物理资源配置。同时,多台边缘设备可以虚拟成一台接入控制设备,将同一个城域网(或者分区域)虚拟化成为单独的网元,网管人员如同配置一台边缘路由器一样,实现统一配置和业务开通,并进行批量的软件升级。城域网的应用场景如图5所示。

(3)接入网场景

接入网中的节点是网络中的海量节点,在日常运维中工作量巨大。在接入网中引入SDN技术,可以实现接入节点管理、维护的大大简化,方便快速部署新的业务。可能的解决方案中,与光线路终端(OLT)相连的远端节点(包括多住户单元(MDU)及ADSL接入复用器(DSLAM等))变成只保留数据面的简单设备,实现流转发,将这些节点的控制面上移到独立的控制器或者OLT当中,远端节点的参数配置均由控制器来下发。

因为远端节点支持流转发,当有新的业务或需要在接入节点中启用新的特性时,很大一部分特性可以直接通过对流表的配置来实现,而不需要进行软件升级,这样大大加快了业务的部署速度。即使有些新业务在现有的控制面不能支持,也只是需要升级控制面,而不需要升级大量的远端节点。

2.2 SDN技术的应用场景探讨

SDN设计之初并不是为通信网络提升效率,而主要是希望通过控制与转发面的分离,可以支持应用可编程的网络能力开放,以加强应用对于网络资源使用的管控力。因此,虽然SDN的引入可以支持控制面的集中化,简化运维并降低运维成本,也可以通过控制层软件的开放,支持客户化定制软件的创新,但是也同样带来了很多的技术挑战和问题:

(1)虽然Google等应用提供商具有部署SDN的商用案例,但是对于大型网络中引入SDN技术,多域的组网以及大量转发设备的控制算法是非常复杂的,且SDN技术中基于流的转发性能是否能支持互联网海量的数据转发也是有待验证的问题。

(2)控制层成为网络的关键,网络操作系统NOS将会和PC操作系统、智能手机操作系统一样成为网络链条中的核心,集中式的控制核心对于运营商网络的安全可靠性要求更高,且对NOS的控制能力提出灵活性、自适应性等更高的要求。

➡下转第21页

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.zzz
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130903.1738.001.html

软件定义网络与FINE

Software-Defined Networks and FINE

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0006-005

毕军/BI Jun
胡虹雨/HU Hongyu
姚广/YAO Guang
冯涛/FENG Tao
（清华大学，北京 100084）
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要： 基于软件定义网络（SDN）的核心理念——3层抽象，提出了一种采用SDN思路的网络体系架构——未来网络体系结构创新环境（FINE）。在FINE体系架构基础上，研究了新型转发抽象技术及开放网络设备，构建了支持多域互联的网域操作系统，构建了全网级虚拟化云平台，实现了多元开放设备的统一管理和控制，进行了新型网络体系结构和新型IP协议的研究试验。

关键词： 未来互联网；软件定义网络；OpenFlow协议；未来网络体系结构创新环境

Abstract: The core concept of software-defined networking (SDN) is three-layer abstraction. We propose a new kind of network architecture, called future network innovation environment (FINE), that is based on SDN. We describe the new forwarding abstraction technology and new open network equipment in FINE and build a network operating system that supports the connection of multiple SDN domains. We build an entire network-level virtualization cloud platform. This allows for unified management and control of open equipment. We also trial new network architectures and IP protocols.

Keywords: future Internet; software-defined networks; OpenFlow; FINE

互联网经过几十年的发展，已经成为世界上覆盖范围最广、规模最大、信息资源丰富的社会和经济高度依赖的全球信息基础设施，对社会进步、经济发展和国家安全具有重大战略意义。随着互联网使用目标、覆盖范围、应用类型的不断扩大，互联网面临着许多重大技术挑战，如服务质量无法有效保证，网络安全难以根本解决，网络管理手段匮乏，新协议/新功能难以部署等。这些问题的本质原因主要是由当前互联网自身体系结构所决定的，所以，设计全新的未来网络体系结构以解决当前网络所存在的问题已经成为学术界、产业界和运营商的迫切需要。

世界上许多国家都十分重视未来网络体系结构和创新环境的研究和建设。20世纪90年代开始，美国和欧盟相继提出了FIND[1]、GENI[2]、FIRE[3]、4WARD[4]等未来互联网体系结构和创新环境研究项目；2006年，日本启动新一代网络架构设计AKARI[5]项目；美国NFS基金会2010年又设立未来互联网体系结构（FIA）计划[6]，重点资助NDN[7]项目、Mobility First[8]项目、NEBULA[9]项目、XIA[10]项目。这些项目有些旨在设计全新的网络体系结构，有些旨在为新网络体系结构/新协议提供试验环境和试验平台，最终促进替代当前互联网体系结构的新型网络体系结构的诞生。

用户/业务对网络的需求是无止境的，同时未来社会对网络的需求也是无法预知的，因此如果一个新型网络体系结构是封闭和僵化的，则网络中待改进的问题只能通过不断修补的方式来解决，同时新功能和新协议很难在网络中得到部署和应用，势必将加剧网络的复杂度及管控难度，必将会重蹈当前互联网的覆辙。为了促进互联网体系结构的开放和易于创新，软件定义网络（SDN）的思想应运而生。

SDN的思想是通过将网络控制与网络转发解耦合，对网络进行抽象以屏蔽底层复杂度，为上层提供简单、高效的配置与管理。OpenFlow[11]技术作为SDN转发抽象的实现技术之一，已经受到学术界和工业界普遍关注和广泛研究。OFELIA[12]于2010年开始采用具有标准化接口的OpenFLow技术来搭建统一新一代网络实验平台。GENI和FIRE在2011年提出将采用OpenFlow技术来构建下一代网体系结构的创新环境。2011年开放网络基金会（ONF）成立，致力于OpenFlow的发展和标准化。国际互联网研究的顶级学术会议SIGCOMM于2012年8月成立HotSDN

收稿日期：2013-06-28
网络出版时间：2013-09-03
基金项目：国家高技术研究发展（“863”）计划项目（2013AA013500）

Workshop 专门会议，并于 2013 年将 SDN 纳入 SIGCOMM 主会的征稿议题。此外，互联网标准化研究组织 IETF/IRTF 于 2012 年 10 月成立 SDNRG 研究组。2012 年 10 月权威机构 Gartner 发布未来十大关键性技术趋势，SDN 排名第二。因此，SDN 已成为网络学术界和工业界最为关注的热点之一。

把握未来互联网发展的机遇期，实现具有中国自主知识产权的软件定义网络技术，建立中国自己的软件定义网络以支持未来网络的技术创新和体系演进，并进一步探索新的网络运行模式、经济模式和演进模式十分必要。

1 软件定义网络概述

1.1 软件定义网络的提出

软件定义网络一词最早出现在 2009 年的 Technology Review（MIT）的一篇介绍 OpenFlow 的文章[13]中，该词用于描述 OpenFlow 技术所带给网络的变革的作用。

在 2011 年成立的开放网络联盟对 SDN 技术应该具有的 2 个原则进行了定义[14]：软件定义的转发和全局的管理抽象。软件定义的转发是指转发功能能够利用开放的接口被外部的程序所控制，全局的管理抽象是指网络应该支持全局管理抽象的基本集。

在第一届开放网络研讨会（Open Networking Submit 2011）中，Scott Shenker 等专家所做的“The Future of Networking, and the Past of Protocols”报告[15]被认为是比较完整的提出了软件定义网络的抽象思想。Scott Shenker 认为软件定义网络应该根据计算机抽象的原理来降低网络的复杂性。他将网络抽象分为转发抽象、状态的抽象和特定功能的抽象。

在第二届开放网络研讨会（Open Networking Submit 2012）中，ONF 发布了软件定义网络的白皮书[16]，给出了软件定义网络的初步定义和架构。软件定义网络是网络控制功能从网络转发功能中解耦出来，并且能够直接被编程。该定义从网络控制的角度描述了网络控制功能的位置变化：从网络设备内迁移到网络设备外，从而实现控制功能与转发功能的独立演进。

1.2 软件定义网络与 3 层抽象

Scott Shenker 等专家认为，网络控制与管理已越来越复杂，不应无限制地纵容网络复杂度的增加，应该通过类似计算机领域的抽象技术对网络的管控进行简化，以屏蔽网络底层复杂度，为上层应用提供简单、高效的配置与管理。为此，SDN 提出网络控制需要 3 个层次的抽象，以实现网络简单、高效、灵活的控制和管理。

（1）转发抽象

所谓转发抽象首先将网络控制功能从网络转发功能中解耦出来，实现数控分离，同时通过定义标准化的转发抽象接口使数据转发与具体硬件实现无关，如同根据统一的网卡接口标准，各网卡生产厂家可以独立生产自己的网卡，同时计算机可以接入不同厂家生产的网卡。

（2）分布式状态抽象

SDN 认为应该引入全局网络视图抽象，以为上层应用屏蔽各种分布式状态信息，为上层应用提供便于管控的全局网络视图。为此，SDN 引入网络操作系统（NOS），负责统一管理网络数据转发设备及分布式状态信息，并为上层应用提供基于全局网络视图的服务。类似于计算机操作系统，NOS 为用户提供统一的网络资源管理等。

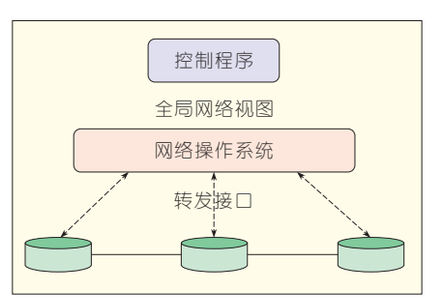
在网络中引入以上 2 个层次的抽象，已基本达到“屏蔽底层、服务上层”的目的，具备了 SDN 的基本特性，因此称之为 SDN v1。SDN v1 对网络的抽象如图 1 所示。图 1 中存在 3 个主体和 2 层接口。3 主体由下向上分别是：物理网络（包含网络设备及其连接）、NOS、构建在 NOS 之上的上层控制程序。3 个主体由 2 层接口连接。物理网络和 NOS 之间是第 1 层接口：转发接口，对应第 1 层的转发抽象。这层接口屏蔽了底层转发的细节。NOS 和上层控制程序之间是第 2 层接口：全局网络视图接口，对应第 2 层的分布式状态抽象。这层接口屏蔽了网络分布式状态的细节。

（3）特定视图抽象

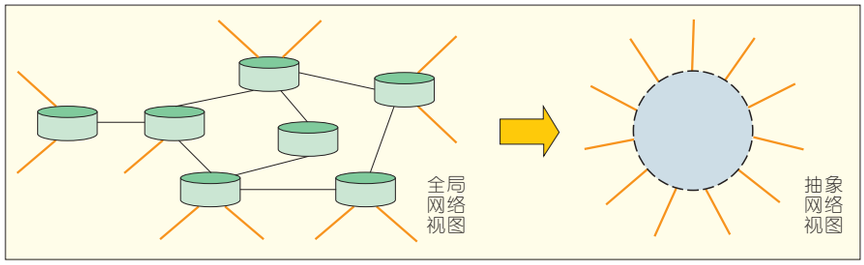
分布式状态抽象已把分布式的网络状态抽象为一个全局的网络视图，供上层控制程序使用，如图 2 所示。但是仅全局网络视图往往不能很好地满足控制程序的需求，例如某些情况下控制程序根据自己的应用需求需要某种特定视角的网络视图，如有些应用仅关心所有的边缘接入网。因此，软件定义网络又引入第 3 层抽象——特定视图抽象。

特定视图抽象的一个具体的例子如下：对于访问控制之类的网络应用来说，它们可能只对一个网络的边缘接入报文、边界网络设备、接入接口感兴趣，而对于网络内部细节则不关心。因此 SDN 在全局视图（图 2 中左部）的基础上，进一步为特定上层应用抽象它所需的网络视图，如只包含边界接入链路、内部是不透明黑盒的一个抽象网络（即图 2 右部，一个抽象网络，中心是不透明实体，周边是上层应用关心的边缘链路连接，橙色粗线），以简化上层应用对下层的控制和提高控制效率。

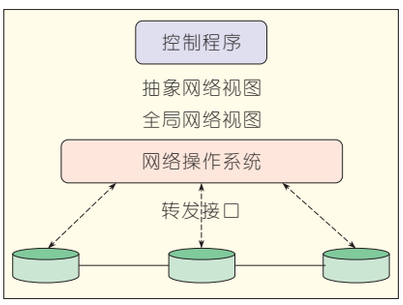
在 SDN v1 的基础上再引入特定视图抽象，形成 SDN v2，如图 3 所示。SDN v2 在 SDN v1 为上层控制应



▲图 1 SDN 的转发抽象和分布式状态抽象



▲图2 SDN的特定视图抽象



▲图3 SDN的3层抽象结构

用提供全局视图的基础上，进一步为上层应用/管控提供满足应用需求的特定视图抽象，将更加简化上层应用对下层网络的使用和控制，有利于促进上层应用的创新。

1.3 存在的问题与不足

尽管SDN成为目前网络界的研究热点之一，但仍然存在问题与不足：一方面，OpenFlow在灵活性、可扩展性和大规模应用等方面存在不足；另一方面，SDN目前还处于发展的初期阶段，在体系结构设计、接口抽象、控制平面扩展以及虚拟化管理方面还需进一步研究，原型系统研制、实验平台构建、新型网络体系结构和业务支持验证等方面尚不成熟。

2 未来网络体系结构创新环境

为真正实践SDN思想，我们提出了基于软件定义网络思路的网络体系结构——未来网络体系结构创新环境（FINE）。FINE体现从传统的网络体系设计方法向易于创新的网络体系设计方法的革命性转变，如图4所示。该结构具有4个显著的网络开放性，第一，通过将网络设备的控制平面与数据平面分离，在设备外部实现统一的网域操作系统，提供全局物理视图和网络控制应用编程接口（API），新体系和新协议能够利用全局物理视图和控制API接口简单、灵活地实现；第二，在网域操作系统之上，可以部署和运行多种网络体系结构和新协议，实现新网络体系结构和新协议的共存，通过共存部署和运行，多种体系和新协议能够充分验证并进行竞争，实现网络体系和网络协议的优胜劣汰；第三，为了满足不同新体系和新协议对网络资源和网络拓扑的不同需求，提出了基于云服务的虚拟化平台，为应用（APP）提供特定逻辑视图和工具集；第四，在数据平面开发多种数据平面，并利用网域操作系统，兼容多种开放、可编程设备的数据平面抽象技术和设备，为不同网络协议对数据平面可编程能力的不同需求提供支持。

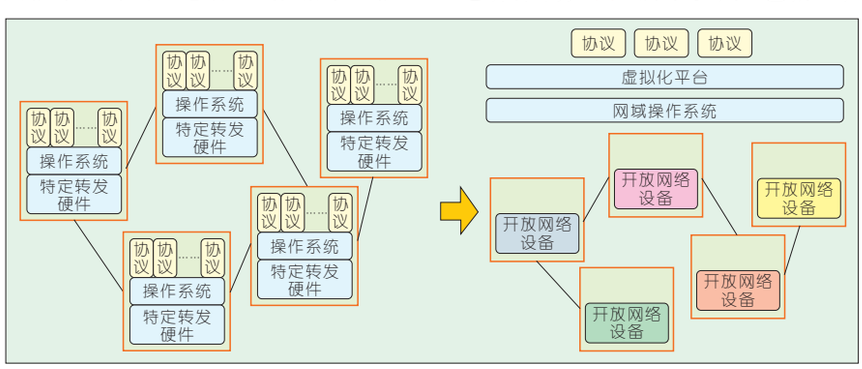
2.1 FINE的设计方法

在系统设计上，FINE创新环境利用抽象设计的思想，建立数据平面抽象、控制平面抽象、网络资源抽象的3层抽象。通过数据平面抽象不仅能够在网络设备层面兼容各种开放的转发技术，实现了既兼顾了试验网建设和部署成本，又能够提供支持网络创新的各类转发能力。通过控制平面抽象，屏蔽了下层多种数据平面抽象的异构性，为上层应用提供了统一的控制接口和统一的网络视图，为新体系和新协议的灵活、高效实现提供了支持。通过网络资源抽象，建立多个特定的逻辑视图，为多个体系和多个业务同时运行提供了平台支撑。

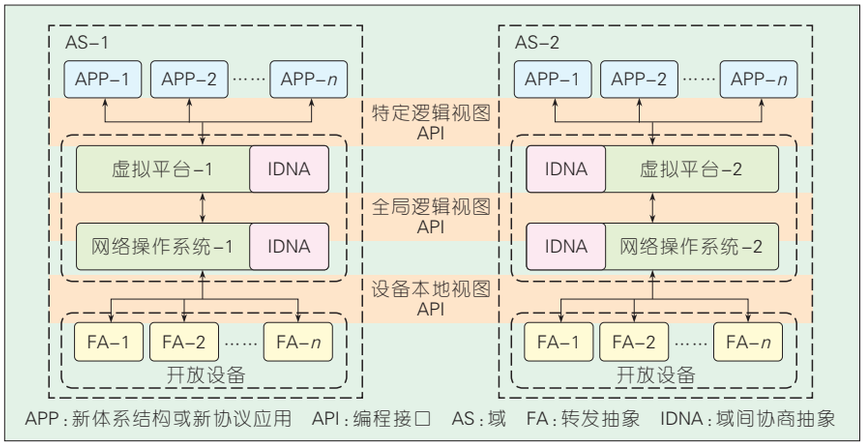
在试验流程上，FINE创新环境将软件开发、调试和运行的软件工程思想运用于未来网络体系结构创新环境。在体系设计和开发阶段，提供了统一的网络视图、控制接口和公共模块，通过模块化的设计简化了体系和协议设计和开发的工作量。在新体系和新协议的测试阶段，引入了“沙盘技术”，使得新体系和新协议能够在网域操作系统层以上就可以调试状态运行新体系和新协议，及时发现功能缺陷和设计时错误，而无需在实际设备上运行。在新体系和新协议运行时，利用“虚拟化”技术，提供多个网络切片，支持多体系和多业务同时运行，保证了在实际运行当中，互不影响的进行功能试验和性能测试。

2.2 FINE的分层结构

根据FINE创新环境的设计方法，参考软件定义网络的思想，FINE的总体架构如图5所示。图5包括4个



▲图4 FINE体现的革命性转变



▲图5 FINE总体架构

层次，即开放设备、网域操作系统、虚拟化平台、上层业务，该架构可更加灵活、方便地支持各种新型网络体系结构和新网络业务。

在FINE总体架构的最下层是开放网络设备，该层通过转发抽象（FA），提供了多种转发抽象技术，实现了设备本地视图的API接口，从而能够以多种能力支持新体系和新协议的创新实现。在开放网络设备之上，将网络的控制平面与转发平面分离，形成一个统一的控制平面，该控制平面以网域操作系统的形式实现，屏蔽下层转发平面的多样性和异构性，并为上层应用提供统一网络视图和统一控制接口。在网域操作系统层之上是虚拟平台层，该层提供网络资源的虚拟化切片和管控测功能。在虚拟化平台之上，是新体系和新协议层，新体系和新协议通过调用控制接口，请求试验的虚拟网络和相应的网络资源，并利用网域操作系统提供的控制接口能够快速实现体系和协议功能。当有两个不同管理域（管理域是指由不同网域操作系统控制和管理的网络）存在时，在管理域间通过跨域协商抽象（IDNA）接口，实现对邻居网络的通信链路、路由、资源和服务质量的协商。

2.3 FINE的功能

FINE创新环境的功能构成可以从不同用户的角度来定义FINE创新环境的功能构成，从新体系和新协议试验者的角度，主要由新体系和新协议实现的支持功能、新体系和新协议试验的调试功能、新体系和新协议运行的隔离功能。从FINE创新环境的管理者的角度，主要由多种数据平面的统一控制功能、网络资源的统一管理功能、网络拓扑的统一维护功能、用户角色的统一授权功能。

2.4 FINE的运行机制

FINE创新环境的运行机制将支持创新网络体系结构的整个生命周期，为新的网络体系结构和新的网络业务提供了从开发-调试-运行-测试的完整的闭环流程，使得新体系和新协议能够在FINE的创新环境中就可以实现螺旋式的演进。

3 “863”计划“未来网络体系结构和创新环境”项目

把握互联网技术发展的机遇，实现具有中国自主知识产权的软件定义网络技术，建立中国自己的软件定义网络以支持未来网络的技术创新和体系演进，并探索新的网络运行模式、经济模式和演进模式十分重要。2013年，国家高技术研究发展计划（“863”计划）启动了“未来网络体系结构和创新环境”项目。项目采用创新理念和技术路线，研究未来网络创新体系结构，突破关键技术，研制新型网络设备和软件系统，建设未来网络体系结构的创新试验环境，研究内容中心网等各种新型网络体系结构和新协议，并依托创新环境进行实验验证，将对中国未来网络发展具有重要意义。

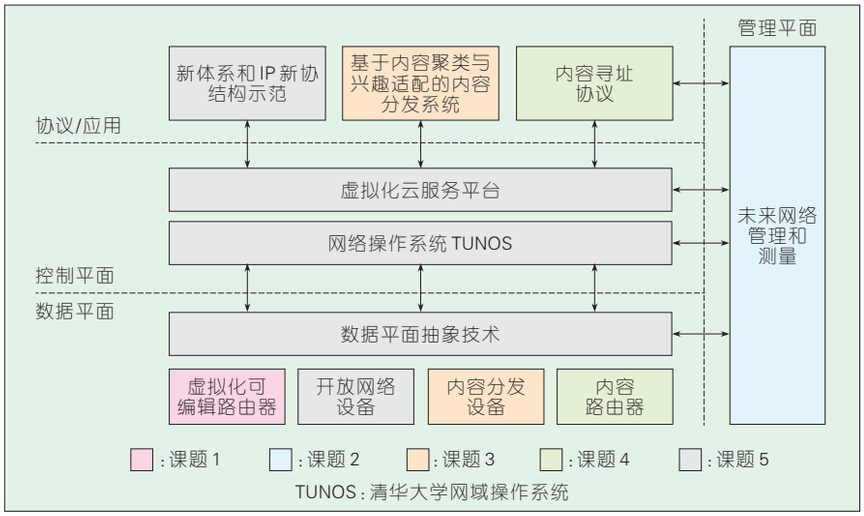
项目在未来网络体系结构创新环境体系架构下，将主要研究：网络的硬件设备、控制软件、虚拟化平台、管理测量和协议/应用示范。“863”计划项目的总体结构及各课题关系如图6所示。

（1）数据平面

在数据平面，项目提出设计和实现多种的开放网络设备。“虚拟化可编程路由器”作为项目的主要支撑设备，将能够支持各类体系和新协议对数据平面的要求，同时提供资源隔离的协议运行的硬件环境。以内容为中心的网络已经成为未来网络体系的重要的典型应用，为此，项目将从内容分发和内容寻址两个方面进行研究并实现“支持内容计算的新型网元设备”和“基于内容寻址的内容路由器原型设备”，构成面向内容应用的数据平面设备。为支持网络创新环境的建设，兼顾网络创新能力和环境建设成本的考虑，项目将研制3类开放网络设备，用于构建中等规模的网络创新平台。以上多种网络设备共同构成了开放网络体系的多元的数据平面，并通过数据平面抽象技术实现开放的控制接口，为不同网络体系在数据平面的实现提供了有效的支撑。

（2）控制平面

在项目中，网络的控制平面主要由网域操作系统TUNOS和虚拟化云服务平台组成。“网域操作系统”通过数据平面抽象接口实现对数据平面多种开放网络设备进行控制，同时为新体系和新协议提供易于使用的控制平面抽象接口和统一的控制机制，从而实现整合多样的数据平面抽象、降低新体系和新协议设计与试验的



▲图6 “863”计划项目的总体结构及关系

复杂度，从普通网络操作系统向网域操作系统转变。“虚拟化云服务平台”基于网域操作系统为新体系和新协议提供设计、运行和验证的共存环境，具有有效资源隔离、简化协议实现的特点，同时，能够在云平台上实现新体系和新协议的整个生命周期：推演阶段-试验阶段-运行阶段。

（3）协议/应用

在项目中，将对以内容为中心的2类应用“基于内容聚类与兴趣适配的内容分发系统”和“内容寻址协议”进行试验和验证。另外，为验证网络创新环境的普适性，项目还将对其他新体系和IP新协议进行示范和验证，如网络安全的新协议——IPv6域内源地址验证、IPv6域间源地址验证，支持泛在移动的新协议——ILNP，创新路由转发技术——二维路由，适用于广电网络的新技术——IP视频新协议等。

（4）管理平面

网络管理和测量是网络体系的重要组成部分。项目将主要针对未来网络的虚拟化、动态性等特点，实现面向未来网络的管理和测量技术研究。通过未来网络管理和测量技术研究，实现信息感知、信息测量、资源调度和跨网协商等管理和测量能力，为未来网络创新环境的高效、可靠运行提供保障。

4 结束语

目前SDN目前还处于发展的初期阶段，为真正实践SDN思想并发展SDN技术，我们提出了基于软件定义网络思想的网络体系结构——FINE。在FINE体系架构下，研究多种新型转发抽象技术及开放网络设备，构建支持多域互联的网域操作系统、构建全网级虚拟化云平台，实现多元开放设备的统一管理和控制，进行新型网络体系结构和新型IP协议的研究试验，对于实现SDN思想真正走向实际应用具有重要意义。

参考文献

[1] NSF NeTS FIND Initiative (FINE) [EB/OL]. [2012-09-18]. http://www.nets-find.net.
[2] Global Environment for Network Innovations (GENI) project [EB/OL]. [2012-11-15]. http://www.geni.net/.
[3] Future Internet Research and Experimentation (FIRE) project [EB/OL]. [2013-01-18]. http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire/.
[4] The FP7 4WARD project [EB/OL]. [2013-01-18]. http://www.4ward-project.eu/.
[5] AKARI architecture design project [EB/OL]. [2012-12-08]. http://akari-project.nict.go.jp/eng/index2.htm.
[6] NSF future Internet architecture project [EB/OL]. [2012-09-18]. http://www.nets-fia.net/.
[7] Named data networking project [EB/OL]. [2013-03-11]. http://www.named-data.net/.
[8] Mobility first future Internet architecture project [EB/OL]. [2013-06-12]. http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/.
[9] NEBULA project [EB/OL]. [2012-08-15]. http://nebula.cis.upenn.edu.
[10] eXpressive Internet architecture project [EB/OL]. [2012-07-12]. http://www.cs.cmu.edu/~xia/.
[11] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(2): 69-74.
[12] OFELIA project [EB/OL]. [2013-02-18]. http://www.fp7-ofelia.eu/.
[13] GREENE K. TR10: Software-defined networking [J]. MIT Technology Review, 2009,38(8): 66-69.
[14] Open Networking Foundation [EB/OL]. [2013-05-18]. https://www.opennetworking.org/.
[15] SHENKER S, MCKEOWN N. The future of networking and the past of protocols [EB/OL]. [2013-08-13]. 2011. http://opennetsummit.org/talks/shenker-tue.pdf.
[16] Software-defined networking: The new norm for networks [R]. White Paper.ONF, 2012.

作者简介

毕军，清华大学信息网络工程研究中心网络体系结构和IPv6研究室主任、教授、博士生导师；主要研究领域为互联网体系结构和协议、下一代互联网和IPv6、未来互联网、SDN等；已主持基金项目10项；已发表论文110余篇，其中被SCI、EI检索100余篇。

胡虹雨，清华大学信息网络工程研究中心网络体系结构和IPv6研究室教师、博士；主要研究领域为未来互联网体系结构、SDN等；已发表论文10余篇。

姚广，清华大学博士毕业；清华大学博士后/助理研究员；主要研究方向为软件定义网络、网络科学等；已发表SCI/EI论文10余篇。

冯涛，清华大学计算机科学与技术系在读博士研究生；主要研究方向为未来网络体系结构、OpenFlow/SDN、网络管理等。

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.003
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130822.1612.002.html

软件定义网络架构研究与实践

SDN Architecture: Research and Practice

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0011-005

兰巨龙/LAN Julong
莫涵/MO Han
胡宇翔/HU Yuxiang
（国家数字交换系统工程技术研究中心，河南 郑州 450002）
(National Digital Switching System Engineering &Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

摘要： 通过分析SDN的研究背景，阐述了SDN由应用层、控制层、基础设施层组成的3平面架构；基于OpenFlow的实现方案和以Juniper、思科等公司解决方案为代表的其他实现方案，对SDN架构的实现进行了探讨；从科研和商业化的角度出发，展示了最新的基于SDN架构的实践与应用。

关键词： 软件定义网络；平面架构；OpenFlow协议

Abstract: In this paper, we discuss the architecture of software-defined networks. This architecture comprises application layer, control layer, and infrastructure layer. We also discuss the implementation of OpenFlow-based programs and other solutions proposed by Cisco and Juniper. We discuss the research into and commercialization of the latest practical SDN applications.

Keywords: software-defined networks; plane architecture; OpenFlow

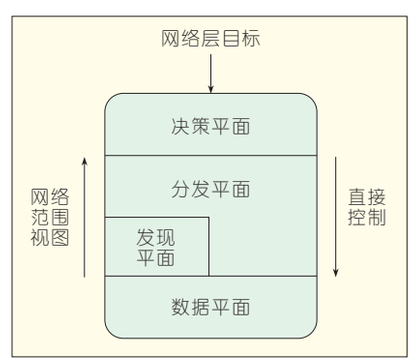
网络虚拟化以及云服务的出现，推动了互联网产业对传统网络架构的重新审视，带来了互联网新的发展趋势，从主动网络架构、开放架构网络体系、ForCES架构，到可重构网络体系、一体化网络体系、软件定义网络（SDN）等，全球研究机构均在探索适应于未来网络业务的具有良好可扩展性和智能性的新型网络体系。其中ForCES基本架构提出的转发与控制分离思想得到了广泛认可，并成为中国可重构网络研究团队和国际SDN研究团队的基础。SDN是由美国斯坦福大学Clean Slate研究组提出的一种新兴的网络架构，其核心思想是基于控制和转发相分离的思路，实现了网络和业务的可编程。自2011年以来，SDN已经逐步成为通信界最热门的词语之一，同时，被列为影响未来10年的10项技术之一，得到了学术界和工业界的广泛认可，成为引领未来网络发展方向的研究内容之一。

SDN的基本内涵就是一个开放可编程网络，该网络通过软件定义（或软件驱动）方式就可实现网络资源的动态管理。基于此，用户可通过编程动态构建各种特性的数据转发网络，以实现各类网络对各种应用的承载需求，进而便于用户实现类似虚拟化、数据中心网络等新型应用。

1 研究背景

传统互联网中，数据转发与控制逻辑紧耦合，导致网络控制功能复杂，阻碍了新技术在控制层面的部署，使得控制层面的灵活性和扩展性很难适应网络的飞速发展。SDN的核心理念是控制与转发分离，具有前所未有的可编程性、自动化以及网络控制能力，确保了网络的高度可扩展、灵活，提高了网络的创新能力。SDN的前身来源于斯坦福用于企业集中安全控制的Ethane项目[1]及其前一个项目SANE[2]。

SANE是斯坦福大学2006年提出的一种面向企业网的安全管理架构。SANE的主要特点在于定义了一个保护层，该保护层位于链路层和网络层中间，由一台逻辑中央服务器控制，用于管理所有路由和接入控制决策。SANE在设计时，遵循4D架构的设计原则，如图1所示。通过全局网络视图，决策平面做出网络控制决策，并直接下发给数据平面；数据平



▲图1 4D架构

收稿日期：2013-07-03
网络出版时间：2013-08-22
基金项目：国家重点基础研究发展（“973”）规划（2012CB315901、2013CB329104）

面根据决策平面的指令，实现对网络层目标的直接控制；分发平面在决策平面和数据平面之间建立可靠的通信通道；发现平面负责发现网络中的物理组件，并为决策平面提供构建网络视图的基本信息。

2007 年，Casado 等人对 SANE 的功能进行了扩展，提出了 Ethane 架构。Ethane 在网络管理中添加了安全管理策略，扩充了中央控制器的管理功能，实现了更细粒度的流表转发策略。Ethane 网络主要由中央控制器和 Ethane 交换机两个部件构成。中央控制器是网络的控制决策层，实现了网络主机认证、IP 分配和交换机流表生成等基本功能。Ethane 交换机则作为一个数据转发单元，根据控制器产生的流表进行数据转发。

现有网络路由器同时包含数据转发和控制决策两种功能，复杂性太高，导致灵活性和可扩展性不够。在 SANE 和 Ethane 两个项目基础上，面对目前日益增长的带宽需求，Casado 提出了分组交换网络软硬件功能分离的思想[3]，即用软件来实现控制决策，而硬件只缓存这些决策，专注于数据的转发。这种软硬件功能分离的思想，明确了软件层来做决策和硬件层控制分组转发的设计思路。

在上述相关工作的基础上，斯坦福大学的 Nick Mckeown 教授等提出了 OpenFlow 技术[4]，为网络设备中的数据转发和路由控制两个功能进行分离提拱了一种实现协议。OpenFlow 通过集中式的控制器以标准化的接口对各种网络设备进行管理和配置。OpenFlow 技术后经由 Clean-State 项目推广，以及在全球网络创新环境（GENI）项目中的应用，逐渐扩展并发展成为了 SDN。

2 SDN 架构

SDN 的概念最早由开放网络基金会（ONF）[5]在 2010 年提出。通过 SDN，现有的静态网络可以演变成一个可扩展的服务交付平台，能够快速响应不断变化的业务、用户和市场需求。通过将转发平面与控制平面分离，SDN 能够将网络抽象为一个逻辑或虚拟实体，并且可以提供标准化的、开放的控制接口。分离后的控制平面可以运行在外部调用控制接口，并根据全局的网络视图，实现更加灵活的控制能力。ONF 的 SDN 技术白皮书[6]给出了 SDN 架构的逻辑视图，如图 2 所示。

在 SDN 架构中，最上层为应用层，包括了各种不同的业务和网络应用。应用层根据网络不同的应用需求，调用与控制层相接的应用编程接口（API），实现不同功能的应用程序。利用 API 接口，业务应用可以充分利用网络的服务和能力，并在一个抽象的网络上进行操作，实现常见的网络服务，包括路由、组播、安全、访问控制、带宽管理、流量工程、服务质量、处理器和存储优化、能源使用以及各种形式的政策管理，量身定制以满足业务目标。

SDN 的控制层由控制软件实现，摆脱了硬件设备对网络控制功能的束缚，主要负责集中维护网络拓扑及网络状态信息，实现不同业务特性的适配。利用控制数据平面接口，控制层可以对底层网络设备的资源进行抽象，获取底层网络设备信息，生成全局的网络抽象视图，并通过 API 接口提供给上层应用。其结果是，对于上层应用程序来说，网络呈现为一个单一的逻辑开关。通过这种软件模式，网络管理人员可以灵活配置、管理和优化网络资源，实现了网络的可编程及灵活可控。

基础设施层由网络的底层转发设备构成，包含了特定的转发平面抽象。在 SDN 中，网络设备只负责单纯的数据转发，降低了对网络设备硬件的要求。

在 SDN 架构下，通过软件的更新即可实现网络功能的升级，无需再针对每一个硬件设备进行配置，通过网络服务和应用程序的形式可直接部署实现网络配置，加速了网络部署周期；同时，通过 SDN 控制软件的集中化控制，研究者、企业和运营商可从一个单一的逻辑点获得全网控制权，极大地简化了网络的设计和运行，从而加速了网络创新周期。此外，SDN 架构使网络设备从封闭走向开放，网络设备不再需要理解和处理成千上万的协议标准，极大地简化了底层网络设备的功能，有效降低了网络复杂度及网络构建成本。

3 SDN 实现方案

3.1 基于 OpenFlow 的实现方案

OpenFlow 作为 SDN 的原型实现方

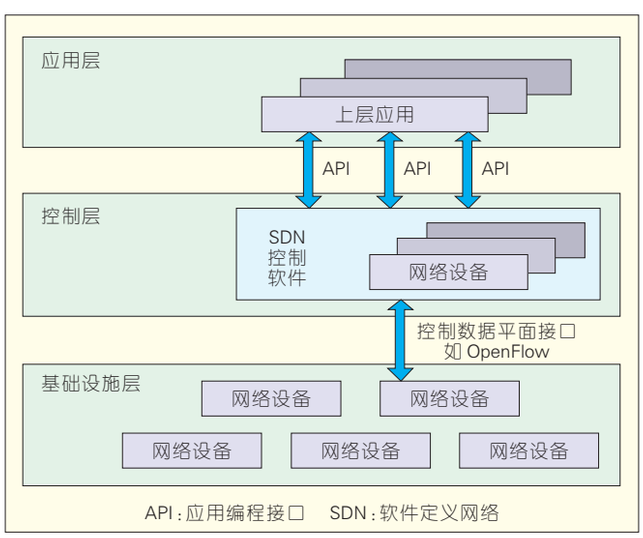


图 2 ▶
SDN 的 3 平面架构

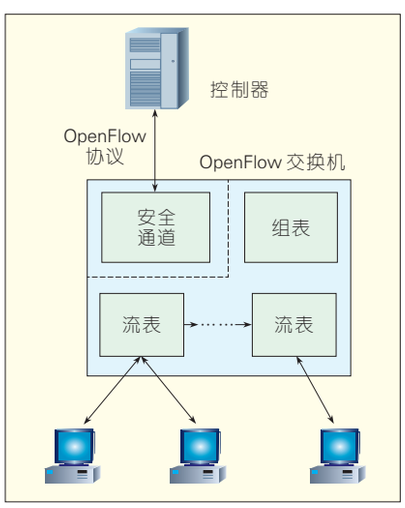
式，虽然只是SDN控制平面和数据平面之间多种通信协议之一，但已被看作是SDN通信协议事实上的标准。基于OpenFlow实现的SDN架构主要包括控制器和OpenFlow交换机两部分，如图3所示。

控制器以软件平台的方式存在，并对全局网络拓扑具有可见性和可控性。同时，借助于开放的协议，控制器可以对不同交换机中的数据流表进行编程，以决定每个数据包的流向，并能够实现特殊网络设备才具有的一些功能，例如防火墙、负载均衡器等。

在控制器中，由网络操作系统（NOS）实现控制逻辑功能。NOS是网络实现可编程控制的中央执行单元，即SDN架构中的控制软件，通过在NOS之上运行不同的应用程序能够实现不同的逻辑管控功能。基于OpenFlow的SDN控制器已有诸如NOX[7]、Onix[8]、POX[9]等多种平台。

OpenFlow交换机由一个或多个流表、一个组表以及安全通道组成。控制器通过OpenFlow协议来管理交换机。组表负责数据包的查找和转发。安全通道用于连接OpenFlow交换机和控制器，使OpenFlow交换机和控制器之间的数据、配置信息和指令可以基于SSL进行安全传输。

OpenFlow交换机采取流的匹配



▲图3 基于OpenFlow的SDN关键组件

和转发模式，匹配过程从第一个流表开始。流表包含了多个流表项，数据包按照流表项的优先级进行匹配，若匹配到一个流表项，则执行与该流表项对应的指令。根据OpenFlow协议，针对流表中的流表项，控制器可以完成增加、更新以及删除等操作。

3.2 Juniper、思科和中国的实现方案

基于OpenFlow的SDN技术引起了包括IETF、Google、HP、Junifer等各大研究机构以及公司的重视，但在实际应用中，基于OpenFlow的SDN技术仍在存在一些问题：

（1）单纯的基于一个转发表特性的OpenFlow技术不能达到实现网络软件定义的需求。OpenFlow1.x所基于的固定的转发表格式不能很好地描述多个网络层面（二层、三层甚至应用层）各种类型的转发表，描述过程效率较低，为了保持通用性，固定格式的表需要保存大量冗余表域。

（2）控制平面的可扩展性问题。OpenFlow设计之初，仅需通过单控制器来实现网络的管控功能。然而，随着网络规模的增大和业务需求的增加，需要研究控制平面的可扩展性解决方案，即多控制器解决方案。如何实现控制单元之间网络状态（包括拓扑、传输能力、路由限制等）的协同和交互，以保证网络状态的一致性和可扩展性，还需要进行大量深入的研究工作。

因此，除了试图通过升级OpenFlow（拟定义为OpenFlow 2.0）来实现以上需求，多家研究机构及公司提出了不同的SDN实现方案。Google提出了一种基于模块化描述的类似于ForCES虚拟化建模方法的实现思想[10]；在IETF内，Ericsson[11]在IETF ForCES工作组倡导使用ForCES的抽象建模和协议控制基本思想来实现SDN技术。其他具有影响的业界企业如Juniper、思科等也有不同的战略计划。

Juniper的SDN战略突出点在于将网络软件分成4个平面——管理、服务、控制和转发，并在网络中优化每个平面[12]。Juniper重点强调SDN软件方面，将服务软件从硬件中抽象出来创建网络和服务虚拟机，在服务器上加以托管，并利用集中控制器在软件中启用服务链或根据业务需求连接各设备上的服务。同时，Juniper提供了新的许可证模式，允许软件许可证在Juniper设备和标准服务器之间的转让，使得客户可以根据实际使用情况决定购买规模。

思科推出的实现方案是开放网络环境（ONE），ONE方案中包含众多的API、代理和控制器，意图将可编程性注入其三大操作系统——IOS、IOS XR和NX-OS之中。

ONE通过开放控制和充分利用转发平面，允许使用人员利用多种协议对网络进行编程，而不仅仅只支持OpenFlow。ONE方案中包括One Platform Kit（OnePK）和Nexus 1000V交换机。OnePK可以为开放人员提供跨思科的各种路由器和交换机操作系统的应用编程接口；Nexus 1000V可用作虚拟覆盖网络的基础设备，用于多用户云部署。

中国在该方向的研究中，“973”计划支持的可重构网络研究团队提出了一种可重构信息通信基础网络体系架构，在基于转发与控制分离思想的基础上，提出网络传输资源和节点资源（包括硬件资源）均可以根据实际业务需求通过软件控制进行重构的思想，并已经取得了实用性成果，在转发与控制分离技术、网络资源感知与重构、网络规模扩展时多控制器之间的协同、路由寻址、网络重构机理、可重构路由器开发等方面进展迅速，并在上海开展了应用示范。

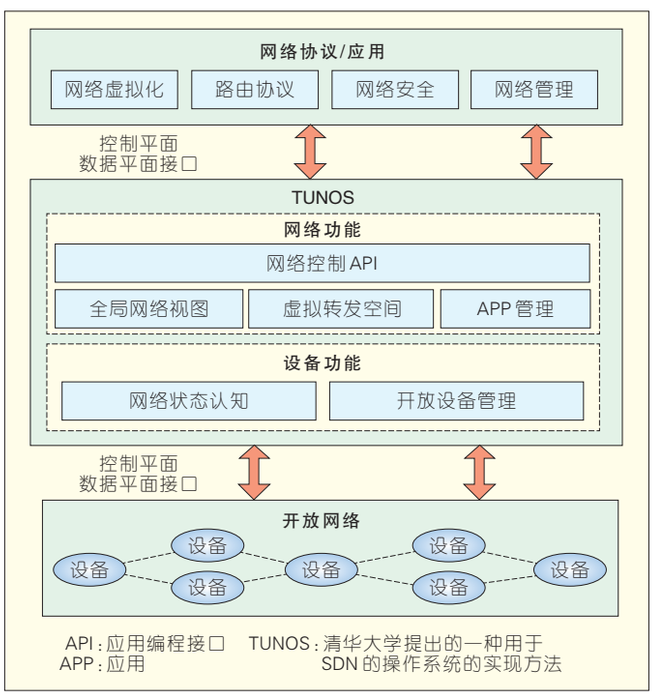
4 SDN的实践应用

SDN一经提出就受到了特别关注，甚至被视为未来网络的最终解决方案之一[13]。在学术界，有关SDN架构的实现方法呈现出一种百花齐放

的研究状态，而在商用领域，SDN 架构的商用化进程也得到了加速发展。

4.1 科研实践

清华大学提出了一种用于 SDN 的操作系统的实现方法 TUNOS[14]。为了增加可扩展性、鲁棒性、灵活性以及提高性能，从设备控制能力以及网络控制能力的角度出发，TUNOS 提供了开放的设备管理、认知网络状态、全局网络视图、虚拟转发空间以及应用（APP）管理功能；同时为了增强用户的网络可编程性，TUNOS 设计了通用的网络控制 API 接口。TUNOS 结构如图 4 所示。



◀图 4
TUNOS 结构

TUNOS 通过控制数据平面接口为网络设备提供控制功能，设备控制功能包括开放设备管理以及网络状态认知。同时，TUNOS 通过上层 API 接口为网络协议层提供控制功能，网络控制功能包括全局网络视图、虚拟转发空间以及 APP 的管理。

Soheil Hassas Yeganeh 等人提出了一种 SDN 网络高效可升级的控制应用卸载框架 KANDOO[15]，如图 5 所示。KANDOO 包括两个控制层：底层控制层包括一组没有互联的控制器，不接收网络状态信息；顶层控制层是逻辑中心控制器，用于维护网络状态。底层控制层中的控制器只运行本地控制应用（例如使用单交换机状态的应用），这些控制器处理了大部分的频发事件，使得这些事件不会到达顶层控制层。顶层是可扩展性方面仅有的潜在“瓶颈”。KANDOO 能够保证网络使用人员根据需要替换本地控制器，并减轻顶层的负载。

除此之外，中国国防科技大学提出了基于 LabelCast 的 SDN 模型，并已经实现了相关的原型系统和开发支持工具[16]。

Andrew D. Ferguson 等在 SDN 网络的分级策略[17]一文中提出了等级流表，在 SDN 网络框架下实现了分等级的策略。

Andreas Voellmy 提出了一种高层网络控制语言 Procera[18]，试图解决 OpenFlow 原型系统中缺乏可配置接口问题。Ramya Raghavendra 等提出了一种基于 SDN 云网络管理的初步动态图查询方法。

4.2 商用实践

2012 年见证了 SDN 在商用领域的重要发展，全球芯片以及设备厂商、互联网企业和运营商均加大了对 SDN 研究的投入，并提出相应的 SDN 解决方案。SDN 商用化进程加速。

在芯片制造方面，全球多家主流芯片厂商推出了支持 OpenFlow 协议的新功能芯片，开始推进 SDN 的大规模商用。其中，Intel 的芯片产品 FM6000 首先加入了对 OpenFlow 优化的硬件支持；中国企业中，盛科推出了支持适配 OpenFlow1.0 的芯片产品。

在设备制造方面，Cisco 公司成立了内部子公司 Insieme，专用于 SDN 相关产品研发；阿尔卡特朗讯发布了其 SDN 产品战略规划，包括对用于局域网（LAN）、广域网（WAN）和数据中心运行的路由器和交换机的实时应用程序进行调整和优化转发；Juniper 的 QFabric 引入了 OpenFlow 作为其控制协议，在中国，信息工程大学、国防科技大学均已经研制成功功能相近甚至更灵活的可重构路由器。

在运营商方面，包括 NTT DoCoMo、Verizon 等在内的国际电信运营商充分利用 SDN 在数据中心建设方面的独特优势，利用 OpenFlow 协

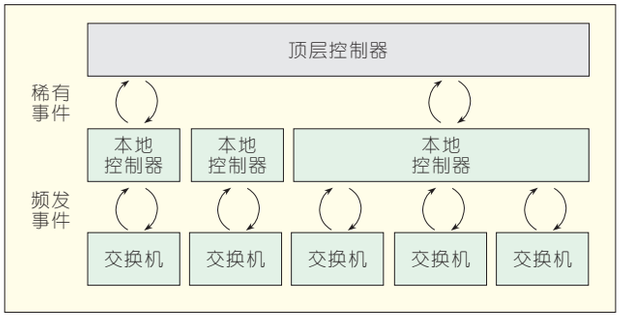


图 5▶
KANDOO 两层控制结构

议构建了全新的数据中心网络架构。

与此同时，互联网企业也开始将SDN架构进行商用。Google宣布已经在其内部骨干网实现了SDN的全面部署，百度也推出了基于SDN架构的产品Traffic Engineering系统。此外，腾讯、阿里巴巴、新浪等几家中国互联网巨头也都已经对SDN进行了相关研究。

5 结束语

相对于传统网络架构难以有效应对用户对移动性、虚拟化服务以及业务快速响应的需求，SDN可以大幅度精简现有的网络设备和网络结构，提高了网络灵活性，将传统网络转变成智能化的技术和业务创新平台。这些诸多优势使SDN受到了科研机构以及商业应用的广泛关注，得以快速发展。然而在SDN的应用过程中还存在着未曾很好解决的问题，制约着其发展：

（1）SDN从提出至今，经历了较长的标准化过程，然而由于应用需求的不同，各大研究机构和主要设备厂商以SDN架构为基础，提出了不同的实现方案。不统一的标准使得SDN设备通用性较差。从长远的角度来看，统一的标准可以为SDN的发展提供良好的环境，标准统一化进程势在必行。

（2）现有SDN方案的管理和安全功能主要集中在接入控制、流量转发和负载均衡等方面，在安全性机制设计、异常检测等方面都缺乏深入的研究。网络管理和安全是SDN架构实际应用中最重要的标准之一，如何提供良好的安全性仍然是SDN研究的重点。

上述两个问题是SDN发展过程中具有代表性的研究点，在面向真实网络的部署过程中，性能优化、可扩展性、分布式控制等需求同样需要重新考虑。从目前的研究和应用来看，基于SDN的技术在学术界和产业界仍处在发展阶段，进一步深入的研究对于未来互联网的发展具有深远的影响。

参考文献

[1] CASADO M, FREEDMAN M J, PETTIT J, et al. Ethane: Taking control of the enterprise [C]//Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2007), Aug 27–31, 2007, Kyoto, Japan. New York, NY, USA:ACM, 2007:12.
[2] CASADO M, GARFINKEL T, AKELLA A, et al. SANE: A protection architecture for enterprise networks [C]//Proceedings of the 15th Conference on USENIX Security Symposium (USENIX'06), May 30–June 3, 2006, Boston, MA, USA. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2006:137–151.
[3] CASADO M, KOPONEN T, MOON T, et al. Rethinking packet forwarding hardware [C]// Proceedings of the 7th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets'08), Oct 6–7, 2008, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2008:6.
[4] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69–74.
[5] Open Networking Foundation (ONF) [EB/OL]. [2012–11–17]. https://www.opennetworking.org/.
[6] Software defined networking: The new norm for networks [EB/OL]. [2012–11–17]. http://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/white–papers.
[7] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. Nox: Towards an operating system for networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(3):105–110.
[8] KOPONEN T, CASADO M, GUDE N, et al. Onix: A distributed control platform for large–scale production networks [C]// Proceedings of the 9th USENIX Symposium on Operation Systems Design and Implementation (OSDI'10), Oct 4–6, 2010, Vancouver, Canada. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010:351–364.
[9] POX [EB/OL]. [2012–11–17]. http://www.noxrepo.org/pox/about–pox/.
[10] YADAV N, COHN D, CRABBE E. OF1.2 Extensibility Proposal [EB/OL]. [2012–11–17]. https://docs.google.com/presentation/d/1LDSQbqNFAW4JGYH72ntP4rwwv850cMRqEfCLK5JnBvY/edit#slide=id.i0.
[11] HALEPLIDIS E, HALPERN J. ForCES packet parallelization [C]//IETF 85 Meeting Presentation, Nov 2012.
[12] DEVLIC A, JOHN W, SKOLDSTROM P. A use–case based analysis of network management functions in the ONF SDN model [C]//Proceedings of the 2012 European Workshop on Software Defined Networking(EWSDN'12), Oct 25–26, 2012, Darmstadt, Germany. 2012: 85–90.
[13] FENG T, BI J, HU H. TUNOS: A novel SDN–oriented networking operating system [C]//Proceedings of 20th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'12), Oct 30–Nov 2,2012, Austin, TX, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:2.
[14] YEGANEH S H, GANJALI Y. Kandoo: A framework for efficient and scalable offloading of control applications [C]// Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA:ACM, 2012: 19–24 .
[15] 吕高锋, 孙志刚, 李韬, 等. LabelCast：一种普适的SDN转发平面抽象 [J]. 计算机学报, 2012,35(10):2037–2047.
[16] FERGUSON A D, GUHA A, LIANG C, et al. Hierarchical policies for software defined networks [C]//Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA: ACM, 2012:37–42.
[17] VOELLMY A, KIM H, FEAMSTER N. Procera: A language for high–level reactive network control [C]//Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA: ACM, 2012:43–48.
[18] RAGHAVENDRA R, LOBO J, LEE K W. Dynamic graph query primitives for SDN–based cloudnetwork management [C]// Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA:ACM, 2012: 97–102.

作者简介

兰巨龙，解放军信息工程大学博士毕业；国家数字交换系统工程技术研究中心总工、教授、博士生导师；主要研究方向为宽带信息网络、新型网络体系结构。

莫涵，国家数字交换系统工程技术研究中心在读研究生；主要研究方向为宽带信息网络。

胡宇翔，解放军信息工程大学博士毕业；国家数字交换系统工程技术研究中心讲师；主要研究方向为新型网络体系、路由与交换技术。

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.004
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130829.1558.002.html

一种面向多样化网络业务融合的SDN网络架构

SDN Infrastructure for Converging of Diverse Network Services

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0016-006

龚向阳/GONG Xiangyang
王文东/WANG Wendong
（北京邮电大学，北京 100876）
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要： 提出一种支持多样化网络业务融合的软件定义网络（SDN）基础架构——SDNIMS。SDNIMS在数据平面上提供了高灵活度的可编程性，支持以软件定义方式实现不同业务异质化的融合数据转发；利用网络虚拟化，为不同的业务网络提供独立且相互隔离管理控制平面；支持多种业务在统一的SDN网络基础设施中的部署。

关键词： 软件定义网络；业务融合；网络虚拟化

Abstract: In this paper, we propose a software-defined network infrasturcture for multiple services (SDNIMS). This infrastructure converges different networks and services. In SDNIMS data plane, highly flexible programmability allows software-defined data forwarding to be implemented for heterogeneous services. The network is also virtualized to provide separate control planes for different network services. The proposed infrasturcture allows diverse services to be deployed in a unified SDN.

Key words: software-defined networks; service convergence; network virtualization

软件定义网络（SDN）[1]是一种革新的网络体系架构设计技术。由于其支持控制与转发分离、开放的编程接口，以及软件可定义的转发控制，SDN极大地提高了实现网络与业务的管理控制的灵活性。当前，SDN已在诸多领域成功应用，但SDN在核心网络架构设计中的应用仍存在大量问题，包括SDN对网络/业务异构性支持、在大规模网络中控制平面的可扩展性与安全性等。

网络与业务融合是未来网络发展的重要趋势，网络基础设施应能支持不同业务融合高效地转发。SDN技术为实现这一目标提供了一条崭新途径。利用SDN的可编程性，设计者能够有效解决网络架构设计中复杂的网络管理与控制问题。

为使SDN网络支持业务融合与服务异质化的网络环境，首先需要在SDN转发平面上提供高灵活度的软件可编程性，以支持多样化的用户需求、设备、通信协议及数据处理方式；其次，需要在控制平面上对不同业务网络进行区分和隔离。将SDN网络资源映射到不同虚拟网络，实现网络虚拟化是一种可行的隔离方案。

1 SDN相关工作

为使SDN网络支持业务融合，文献[2]提出了一种基于OpenFlow的自治SDN框架模型，支持多种业务部署在统一的物理网络上，并在控制平面中利用自治网络技术提高网络和业务的自管理能力。OpenFlow 1.3协议[3]在转发平面中引入了多级流表构成流水线，流表项的匹配采用类型/长度/值（TLV）格式。TLV格式易于扩展，适于支持多种不同的业务和网络协议。欧盟FP7的SPARC[4]多个研究项目探索了如何扩展OpenFlow以满足电信级网络的需求，如支持标签交换和多业务融合。

SDN网络的虚拟化是多业务SDN网络体系结构研究中的另一关键技术[5]。虚拟化需要通过抽象、分配、隔离等机制将SDN物理网络映射为多个虚拟SDN网络，且能够在各虚拟SDN网络上互不影响地部署不同的网络架构和协议体系，支持不同的网络业务，并可按需对虚拟网络进行动态的资源配置。

现有的SDN网络虚拟化方案可分为3类。一是基于交换机的虚拟化[6]，此类方案提供良好的隔离性，但不适于动态的扩展和调整。第二类包括ADVisor[7]、FlowVisor[8]等方案，在交换机与控制器间加入一个虚拟化

收稿日期：2013-06-26
网络出版时间：2013-08-29
基金项目：国家高技术研究发展（“863”）计划（2011AA01A101、2013AA013301）；国家重点基础研究发展（“973”）规划（2009CB320504）

层。此方案简单易部署，但其虚拟化层对用户透明，用户无法通过软件编程方式来动态调整其资源配置。第三类方案在控制器上实现虚拟化，如SPARC、FlowN[9]等，将虚拟化管理作为网络操作系统（NOS）的一项基础服务，支持虚拟化配置的动态调整。

文献[10]探索了在OpenFlow网络中部署内容中心网络（ICN）的方法。研究表明，基于SDN进行创新网络研究通常需扩展SDN功能。然而扩展现有SDN的架构和功能，往往需要代码重写和升级，缺乏灵活性。理想方式是支持用户直接对设备编程，定义新属性和功能。

2 面向多业务融合的SDN基础架构

2.1 目标与需求

业务融合要求在统一的SDN基础设施上支持多样化的业务和应用。不同种类的业务通常需要不同的传输模式、协议和网络管理和控制方式。SDN控制与转发分离的设计思想以及开放、灵活、可编程的特征，为实现多业务融合提供了一条新途径。本文的目标是对SDN网络架构进行扩展，提出一种面向多业务类型、具有高灵活性和可编程性的SDN网络基础架构——SDNIMS。在该架构设计中需解决以下问题：

（1）支持多样化网络业务的融合

SDNIMS架构支持业务运营者以软件定义方式部署多种类型网络业务。该架构应满足不同特性业务的需求，包括实时话音、图像和广播电视业务，传统互联网等，并支持创新网络技术的研究；也可支持不同数据传递模式，在物理接口支持的情况下，实现基于电路交换、标签交换或光交换的SDN。业务开发者能根据业务特性独立地选择不同的数据传输模式、通信协议以及数据处理方式，并在该架构中部署网络业务或进行创新性研究。

（2）网络的虚拟化与隔离

SNDIMS在转发平面上支持多业务的融合；同时也支持不同业务具有各自独立的控制逻辑。SDNIMS将物理网络资源映射到不同虚拟SDN网中；同时，保证虚拟网之间相互隔离，包括网络拓扑/资源的隔离、数据流隔离以及控制流的隔离。网络虚拟化对于上层用户透明，不同的业务提供者可在虚拟网中部署完全异质化的网络架构（寻址/路由和网络协议）、业务以及控制管理逻辑。

（3）物理网络的高灵活可编程性

OpenFlow利用软件定义的流表实现对转发行为的可编程。SDNIMS进一步扩展了用户对物理设备的可编程能力。除流表外，SDN交换机还具有多方面可编程性，用户可对交换结点的多种行为进行细粒度编程，满足业务多样化以及日趋复杂的网络管理控制的需求。交换结点的可编程性包括：可编程的传输转发/交换方式（如分组转发、虚电路交换、标签交换等）、可编程的网络协议、可编程的数据流处理（转发、过滤、QoS控制等）以及可编程的网络管理控制（性能监测、资源管理等）。

2.2 SDNIMS体系架构

SDNIMS的体系结构模型如图1所示。图1整体上分为3个层次：物理网络层、SDN控制器层、业务管理与控制层。

物理网络层（即数据转发层）完成数据传输与转发功能，是整个架构的底层基础设施。物理网络由一系列支持SDN的交换结点依据运营商规划的拓扑互联而成。SDN结点在上层控制器的控制下进行数据流处理（利用扩展的OpenFlow协议）。SDNIMS架构中的交换结点（及物理网络）均支持多样化、高灵活的可编程。在SDN控制器层的统一策略和编程控制下，物理网络构成统一融合的多业务数据传输平面，支持多种业务以不同接入方式、传输/交换模式和网络协议进行传输。

SDN控制器层在架构中承担SDN控制器的角色，在逻辑上可看作是一个集中式控制器，对数据转发层的行为进行统一控制和管理。在物理上，控制器层可由若干相互协作的控制器构成，或采用云计算平台实现，以提高可靠性和可扩展性。对外，整个SDN控制器层表现为一个集中式的逻辑控制器实体。

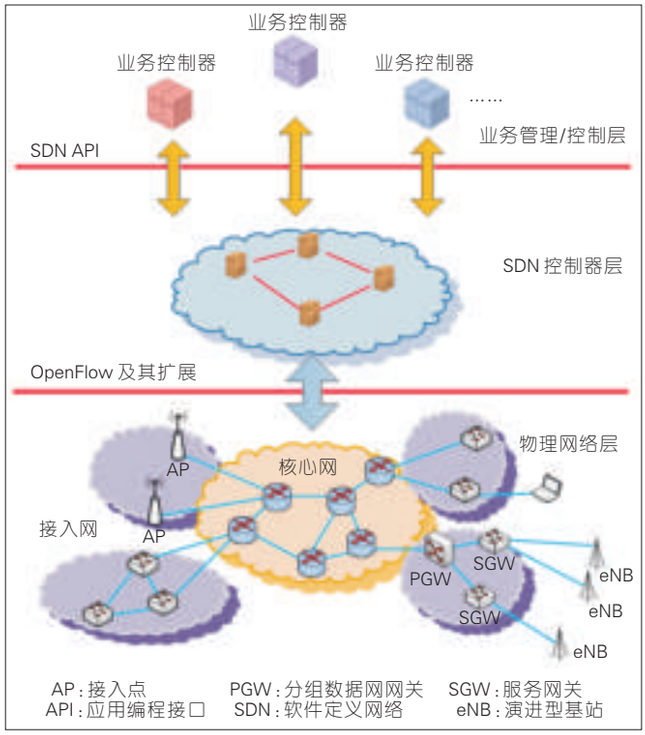
在功能结构上，控制器层由网络操作系统（NOS）及若干基本功能组件（拓扑、资源管理等）构成。其南向接口采用扩展的OpenFlow协议，实现对物理设备的编程和控制；其北向提供SDN应用编程接口（API），使高层软件能对物理网络中的数据传输进行编程和控制。SDN网络的虚拟化是SDNIMS控制器层的重要功能，实现底层物理网络与虚拟SDN网络之间的映射，并保证虚拟网络之间相互隔离。

业务管理/控制层，实现各种业务网络的控制和管理功能。SDNIMS支持基于虚拟网络构建业务网络，不同虚拟网分配给不同的业务提供者，独立部署其业务及其管控逻辑。在用户视角上虚拟SDN网络与实际SDN网络并无差异，均向用户提供NOS、基本的SDN功能及开放的SDN API。业务提供者可在业务控制器上利用SDN的方法，在虚拟SDN网中部署其网络业务和应用。

总体来看，SDNIMS允许不同业务网络的数据流共享统一融合的数据转发平面；同时通过网络虚拟化，将不同业务网络的控制平面的功能相互隔离，分别独立由其各自业务提供者来进行控制和管理。

2.3 SDNIMS功能模型与组件

SDNIMS架构的功能模型及其主要功能组件如图2所示。架构的底层由高可编程的SDN交换机构成。通过扩展的OpenFlow协议，上层软件可对交换机进行多种功能的软件定



◀图1 SDNIMS的体系结构

义，以支持网络虚拟化与多业务融合。SDNIMS的控制部分包括两个层次：SDN控制器层负责全局SDN网络的管理控制，业务管理控制层负责业务网络（虚拟SDN网络）的管理控制。

2.3.1 高灵活可编程SDN交换机

OpenFlow交换机仅支持通过流表实现数据流处理的可编程。该方式适合于互联网的分组转发，但难以满足异构网络协议和多业务融合的需求。新型SDN交换机需提供更多的可编程性，包括：

（1）流表匹配项的可编程

OpenFlow的流表使用分组中一组固定字段作为数据流的匹配项。这实际上是对IP协议进行了预先优化，但无法灵活支持其他协议类型，包括用户定义的新型协议。新型交换机将允许用户灵活定义流表匹配项的格式、位置和类型等属性，实现对异构协议的支持。

（2）数据流操作与处理的可编程

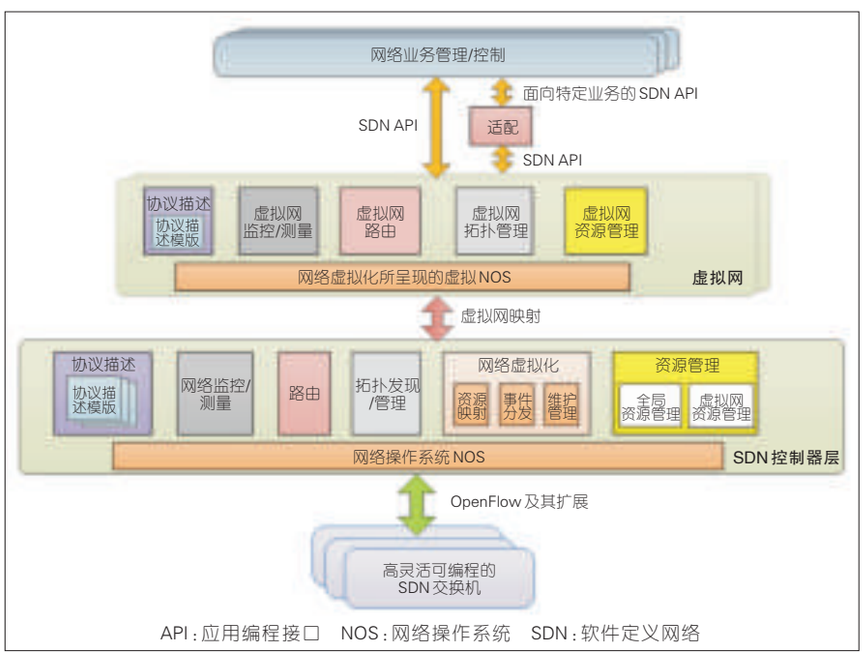
现有OpenFlow流表无法支持诸如隧道封装、标签交换、服务质量（QoS）控制等复杂的数据流处理能力，而这些能力往往是实现网络业务管理控制必需的。解决这一问题的方法是提供一种软件定义的方式，使业务开发者能够按需扩展数据流的处理能力。

（3）网络维护/管理处理与操作的可编程

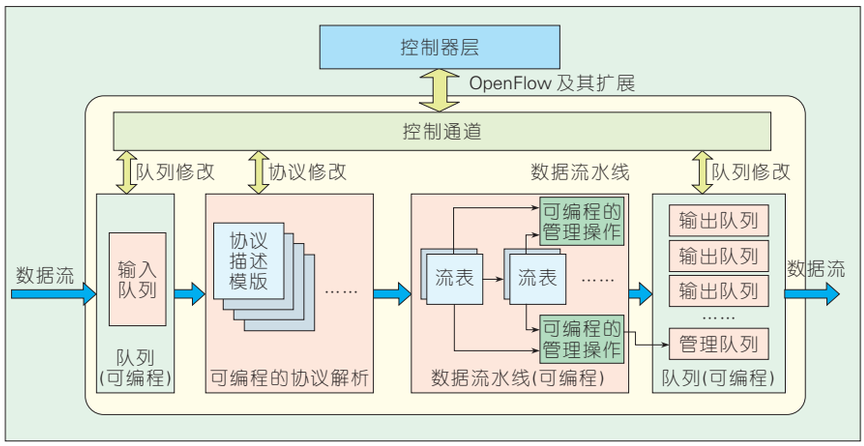
交换机设计将性能监测、资源/队列管理等维护管理的底层操作行为标准化，并开放其编程接口。上层软件能够编程和配置这些底层操作，设计基于软件定义的网络的维护管理功能。

SDN交换机设计结构分为控制通道与数据通道两部分，如图3所示。为支持异构网络协议，数据通道中引入了可编程的协议解析组件，可根据协议描述模版，解析到达分组的协议格式，并提取指定字段作为流表匹配项。协议描述模版由上层控制器配置，使解析组件能识别任意协议格式。输出的流表匹配项以TLV格式表示，在后续的数据流水线（Pipeline）中用于进行流表匹配。

数据流水线中使用并行化的多级流表。通过编程，可将不同业务/协议的流表相互独立，配置成不同的流水线，进行并行处理。流表的操作集合是可扩展的，上层软件可按需定义和添加新的操作方法，以支持复杂的数据流处理，如标签交换、QoS操作、隧道封装、安全性等。



▲图2 SDNIMS的功能结构



▲图3 高灵活可编程的SDN交换机

系统支持以软件定义的方式实现网络管理/维护功能。交换机还增加了与网络管理相关的操作和处理功能。通过对一些特殊流表的配置，上层软件可利用这些操作协同完成网络维护/管理功能。同样，上层软件可定义交换机上各队列的属性、调度策略、带宽和优先级，实现网络资源的精细化管控。

交换机的控制通道负责与上层控制器的交互，其协议采用扩展的OpenFlow。协议扩展用于支持交换机上新增的可编程属性，包括可编程的协议解析和数据流操作，以及性能测量与队列管理等。

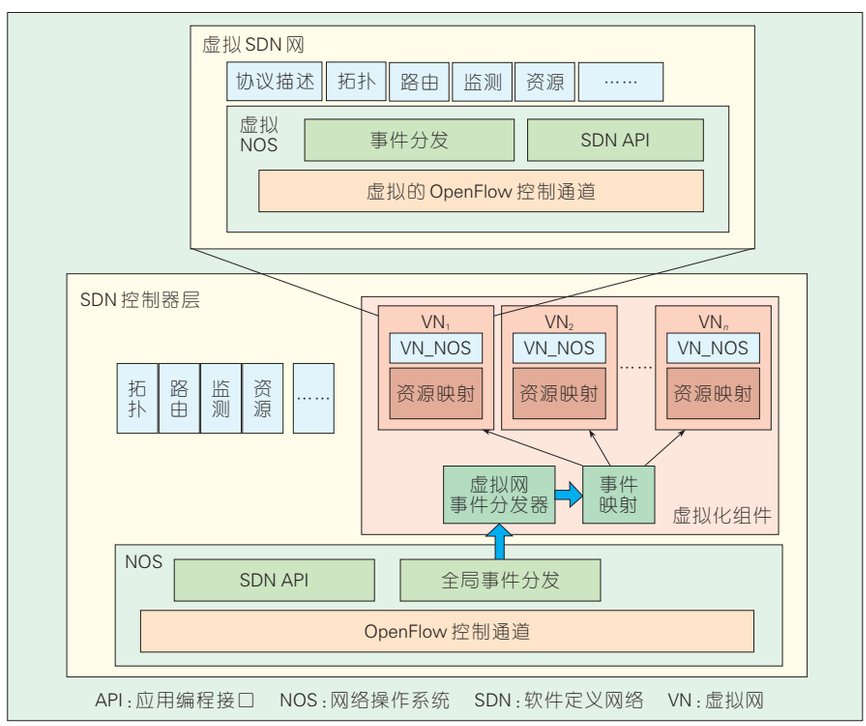
2.3.2 SDN控制器层

SDN控制器层对整个物理网络实现管理和控制，同时向上层提供编程接口。在逻辑上，控制器层是一个集中式实体，包括两部分：网络操作系统（NOS）以及一组SDN基础功能组件。NOS及功能组件主要提供了数据流编程与控制、网络管理、网络虚拟化等3类功能。

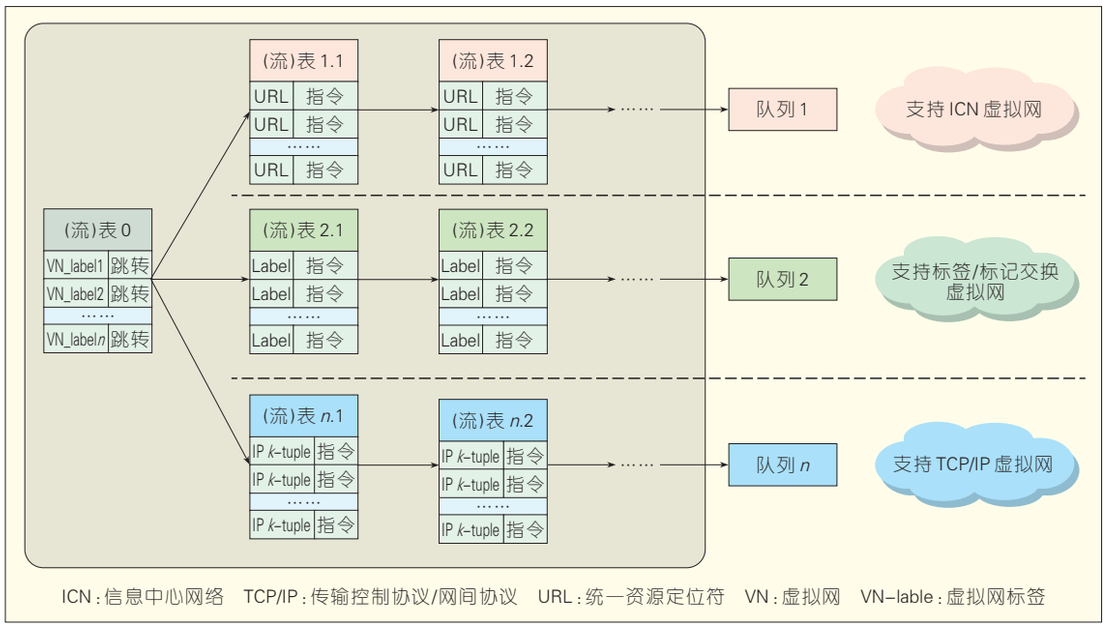
数据流编程/控制功能用于定义交换机上与数据流处理相关的行为和配置，如接口配置、协议描述模板、流表及流表的操作等。网络管理组件提供网络维护管理相关的功能，如拓扑发现和管理、路由，以及网络资源管理和性能监测等。

为支持多业务融合，控制器层实现了SDN网络的虚拟化。不同网络业务分别在隔离的虚拟网中开发和部署。虚拟网管理组件的结构如图4所示。图4实现物理网络与虚拟网之间的拓扑与资源的映射、网络事件的映射与分发以及资源分配与隔离等功能。虚拟网向上层软件提供一个虚拟的NOS以及一组SDN服务组件及其API接口。系统从两个方面实现虚拟网络之间的隔离。一方面通过统一控制的资源及网络事件映射，将不同虚拟网的管理控制平面相互隔离；另一方面，通过对底层交换机的编程（包括对流表、队列的配置），使不同虚拟网络的数据平面也实现了相互隔离。

转发平面为支持多业务虚拟网，交换机中的多级流表和队列将被编程配置成图5所示的形式。利用多级流表的特性，交换机对不同虚拟网络使用的流表进行了隔离。流表被进行逻辑划分，分别为每个虚拟网形成一条独立流表流水线，并为每条数据流水线配置独立的数据转发队列。为区分不同虚拟网的数据流，利用交换机对网络协议和操作的可编程性，在边缘交换机上对不同虚拟网的数据流添加虚拟网标识（VNID）标签（在全网中标识其所属虚拟网）。交换机多级流表中的0号流表作为全局流表，用于匹配和识别到达分组的VNID，并根据VNID将分组引导到其对应虚拟网的流水线上。若到达分组无可匹配VNID，则控制器可向0号流表下发一条特殊流表项，为到达



▲图4 网络虚拟化功能模型



◀图5 高灵活度可编程SDN交换机对虚拟网的支持

分组添加相应的VNID标签，然后进行后续的处理。

SDNIMS允许不同的虚拟网采用不同的网络体系和寻址路由架构。虚拟SDN控制器可根据各自的需要生成专用的流表，这些流表经控制器层的虚拟网管理组件的映射，被编程和配置到物理网络交换机中该虚拟网的流表流水线中。在图5中，虚拟网1支持信息中心网络（ICN）网络架构，其流表中使用统一资源定位符（URL）进行匹配和数据转发；虚拟网2支持标签交换，在其流表中利用分组的多协议标签交换（MPLS）标签来进行转发；采用传输控制协议/网间协议（TCP/IP）架构的虚拟网络则在流表中采用传统的k元组匹配方式处理分组。

2.3.3 业务网络的管理与控制层

不同虚拟网络用户可独立开发和部署其业务网络的控制和管理功能。SDNIMS向虚拟网用户提供标准SDN网络编程API，用户可使用虚拟网NOS、SDN组件及API，利用SDN设计方法和工具，在虚拟SDN网络中开发和部署其网络业务和应用。在SDNIMS中，业务管控系统的功能和设计结构是与其网络业务特性高度相关的，取决于虚拟网用户的设计。

3 SDNIMS架构的应用场景实例

SDNIMS的一个应用场景如图6所示。图6将现有的话音通信业务、广播电视业务和传统互联网部署在统一的SDN物理网络上。不同的网络业务具有不同的需求。话音业务实时性要求高，在管理控制上类似于电路交换的控制。广播电视业务对于网络带宽需求较高，同时需要交换节点能够支持广播式转发。

多业务部署时，首先为每种业务网络定义所需的网络拓扑及资源属性（包括带宽、流表、优先级等），然后定义各业务网络的数据平面所采用的传输协议。SDNIMS交换机支持用户自定义的传输协议，用户可根据需要选择高效的数据传输模式。例如，话音业务和广电业务均可采用标

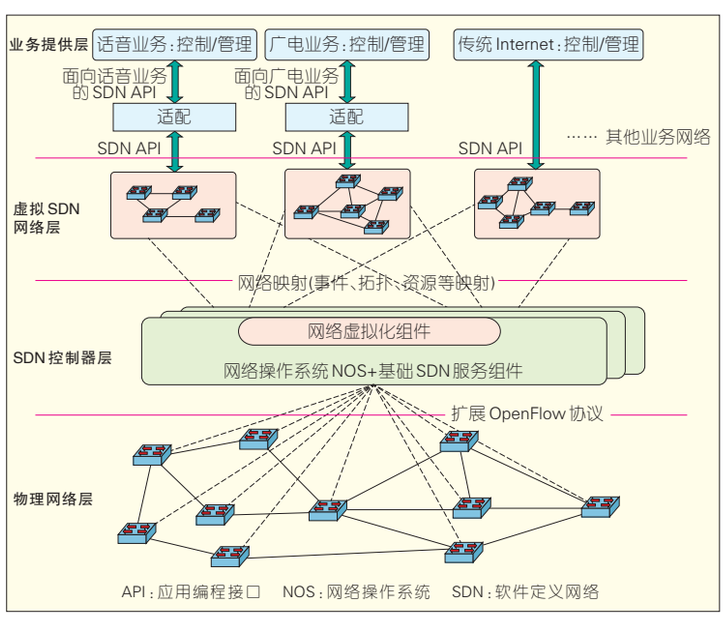


图6▶ SDNIMS的应用场景实例

签交换形式，从而避免繁琐的TCP/IP封装。在此基础上，运营者可利用SDN API来设计和部署其业务管理与控制逻辑。

4 结束语

本文提出了一种支持多业务融合的SDN网络基础架构——SDNIMS。SDNIMS在数据平面上提供了高灵活度的可编程性，支持以软件定义方式实现不同业务异质化数据的融合转发；同时利用网络虚拟化，为不同的业务网络提供独立且相互隔离管理控制平面，支持多样化业务在统一的SDN基础设施中的融合。

参考文献

[1] MCKEOWN N. Software-defined networking: the new norm for network [R]. White Paper. ONF, 2012.
[2] WANG W, HU Y, QUE X, et al. Autonomicity design in Openflow based software defined networking [C]//Proceedings of the 2012 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps'12), Dec 3-7,2012, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:818-823.
[3] PFAFF B, LANTZ B, HELLER B, et al. OpenFlow switch specification, version 1.3.0 [S]. Open Networking Foundation, 2012.
[4] EU FP7 project: SPARC (Split Architecture Carrier Grade Networks) [EB/OL]. [2012-09-12]. http://www.fp7-sparc.eu/.
[5] CHOWDHU N M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization [J]. Computer Networks, 2010,54(4):862-876.
[6] SONKOLY B, GULYÁS A, CZENTYE J, et al. Integrated OpenFlow virtualization framework with flexible data, control and management functions [C]//Proceedings of the 31st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM'12), Mar 25-30, 2012, Orlando, FL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012.
[7] SALVADORI E,DORIGUZZI CORIN R, GEROSA M, et al. Demonstrating generalized virtual topologies in an OpenFlow network [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011,41(4):458-459.
[8] SHERWOOD R, GIBB G, YAP K, et al. Flowvisor: A network virtualization layer [R]. OpenFlow Switch Consortium, 2009.
[9] DRUTSKOY D, KELLER E, REXFORD J. Scalable network virtualization in software-defined networks [J]. IEEE Internet Computing, 2013,17(2):20-27.
[10] VELTRI L, MORABITO G, SALSANO S, et al. Supporting information-centric functionality in software defined networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'12), Jun 10-15,2012, Ottawa, Canada. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2012: 6645-6650.

作者简介

龚向阳，北京邮电大学网络与交换国家重点实验室教授；主要研究方向为未来网络体系结构、软件定义网络、移动互联网及创新应用等；已主持和参加8项基金项目；已发表论文60余篇，其中20余篇被SCI检索。

王文东，北京邮电大学网络技术研究院副院长，国务院"政府特殊津贴"获得者；主要研究领域为未来互联网体系结构和关键机制、网络及业务的服务质量控制与管理技术；已主持和参加18项基金项目；已发表论文160余篇，持有专利20余项。

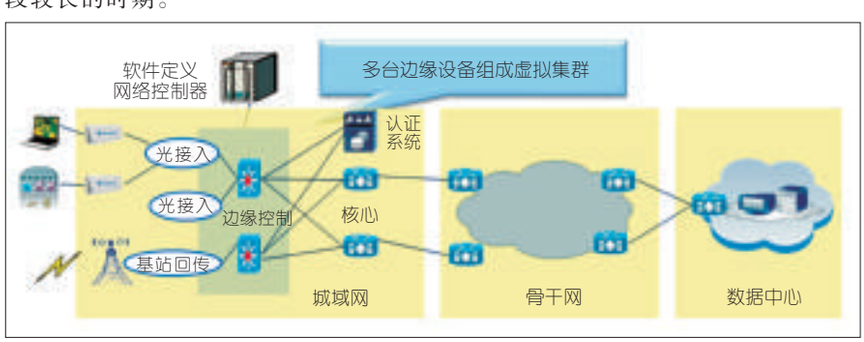
⬅上接第5页

（3）SDN技术的标准除了南向接口OpenFlow的协议比较明确外，控制层的标准以及控制层的北向接口都还未得到业内的统一认识，标准化的力度还较弱，难以形成可商用化的系统或者设备。

综上所述，SDN技术在网络中的引入还存在很多技术问题需要解决，也需要不断推进其标准化的进度，并在不断的实验验证过程中进行技术方案的逐步完善，可以说SDN的理念从提出到逐渐被网络应用仍需要一段较长的时期。

参考文献

[1] Software-defined networking: The new norm for networks [R]. White Paper. ONF, 2012.
[2] 软件定义网络(SDN)研究报告 [R]. CCSA TC1, 2012.
[3] OpenFlow switch specification, Version 1.3.1 [S]. ONF, 2012.
[4] OpenFlow management and configuration protocol (OF-Config 1.1), Version 1.1 [S]. ONF, 2012.
[5] Network Functions Virtualisation. Network functions virtualisation: An introdution, benefits, enablers, challenges, & call for action [R]. Introductory White Paper. ETSI NFV, 2012.
[6] OpenFlow-enabled cloud backbone networks create global provider data centers [R]. ONF, 2012.
[7] Nicira. network virtualization platform [EB/OL]. [2012-11-14]. http://nicira.com/en/network-virtualization-platform.



▲图5 城域网的SDN应用场景

作者简介

王茜，北京邮电大学通信与信息系统博士毕业；中国电信股份有限公司北京研究院高级工程师；长期从事IP网络规划和技术研究，专业领域为IP网络规划和架构优化、下一代互联网过渡技术、智能网络架构和策略控制技术、流量分析优化等；已提交标准文稿30余篇，发表学术论文20余篇，出版著作5部。

赵慧玲，中国电信股份有限公司北京研究院总工程师、教授级高工、博士生导师，中国电信云计算研究中心主任，MEF董事会成员，信息产业部通信科技委委员；主要研究领域为高智能网络、云计算等；已获国家科技进步二等奖2项、部级科技进步一等奖3项、二等奖8项、三等奖8项，申请专利16项，出版著作13部、译著2部，发表论文近百篇。

解云鹏，北京邮电大学电信工程学院硕士毕业；中国电信股份有限公司北京研究院高级工程师；长期从事IP网络技术研究以及相关标准制订工作。

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.005
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130830.1538.003.html

对软件定义网络数据面抽象的重新思考

Data Plane Abstraction in Software-Defined Networks

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0022-004

孙志刚/SUN Zhigang
吕高锋/Lü Gaofeng
陈一骄/CHEN Yijiao
（国防科技大学 计算机学院，湖南 长沙 410073）
(School of Computer National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要： 提出了一种基于标签的更加灵活的SDN交换机数据面抽象——LabelCast。LabelCast利用标签交换机制解决SDN交换机中的复杂规则匹配问题，采用Cast程序扩展机制解决交换机转发面的功能可编程问题。LabelCast不但可以简化SDN数据面规则匹配复杂性，还可以通过在数据面加载应用的处理程序支持可编程的数据面功能扩展。

关键词： 软件定义网络；数据面；抽象

Abstract: In this paper, we propose a flexible data plane abstraction for software-defined networks. This abstraction is called Labelcast. The complex rule-matching problem can be solved by using label switching mechanisms, and programming the functions of the switch-forwarding plane can be simplified using the Cast program extension mechanism. Labelcast decreases complex rule-matching and supports function extensibility in the data plane of SDN switches.

Keywords: software-defined networks; data plane; abstraction

经过多年发展，软件定义网络（SDN）/OpenFlow的研究和标准化进入一个关键阶段。

一方面，美国计算机协会数据通信专业组（SIGCOMM）上首次出现多篇SDN的论文，标志着SDN正式受到学术界的认可。中国盛科公司推出业界第一款支持OpenFlow多级流表的芯片Bigbelt和支持OpenFlow1.3标准的交换机产品V350。同时，2013年4月OpenFlow 1.3.2标准推出，保持半年更新一个版本的速度。

收稿日期：2013-07-15
网络出版时间：2013-08-30
基金项目：国家重点基础研究发展（“973”）规划（2012CB315906）；国家高技术研究发展（“863”）计划（2013AA013505-02）

另一方面，对SDN/OpenFlow的理性思考也逐渐增加，2013年5月SDN技术主要推动者加州大学伯克利分校的Scott Shinker将自己演讲的题目定为“Software-Defined Networking at the Crossroads”，认为SDN的发展正处在一个十字路口，重大转型即将出现。SDN的重要发明人Martín Casado在其论文中认为目前OpenFlow是在网络核心和网络边缘对数据平面需求的一个“An Unhappy Medium”。工业界评论中也越来越多出现了类似“OpenFlow不是网络演进的唯一路径”的标题，甚至著名的IT评论网站Network Computing的评论做出了OpenFlow在2014年必死的预测（Prediction: OpenFlow Is Dead by 2014）。设备厂商在2013年也推出了协议无关转发（POF）技术，将SDN中的OpenFlow演化到更加灵活的编程模型，而不再受预先定义协议类型或转发规则的限制。报文转发行为可由控制器上的软件通过细粒度的转发指令（包括数据偏移量和长度）定义，而转发的报文可以不再经过软件控制器的处理。基于POF，路由器的转发引擎已经不再与协议类型相关，因此支持更多的应用场景。

本文首先对OpenFlow提出的背景和发展历程进行了重新审视，重点对OpenFlow标准化中的一些技术上的重要决断进行讨论和对OpenFlow最新的发展动向进行分析，通过分析指出复杂的转发规则匹配和难以支持新型网络体系结构的部署是目前OpenFlow发展遇到的重要难题。然后对多协议标签交换（MPLS）部署的成功进行分析，通过借鉴MPLS体系结构在简化转发处理和支持多种协议方面的优点，本文提出了新的SDN网络数据面抽象——LabelCast，介绍了LabelCast的工作原理，并对实现的

相关问题进行了讨论。

1 OpenFlow 发展面临的问题

1.1 OpenFlow 最初需要解决的问题

Martin Casado 在 2008 年的文献[1]中指出，硬件实现转发要有 3 个重要的特性：软硬件接口明确、硬件实现简单、支持灵活高效的功能实现。

文献[1]认为目前硬件实现分组转发的逻辑十分复杂，因此提出了首先由软件对报文流的第一个分组做出转发决策，然后由硬件模仿这一决策，对流内后续的分组进行转发的方案。这种转发的特点是各种网络协议实现对硬件没有限制，即硬件设计不必为支持某种特定的协议而进行专门优化。同时网络硬件实现对协议也没有限制，未来出现的各种协议也不会因为硬件平台的限制而难以部署。

OpenFlow 白皮书[2]也提出了 OpenFlow 设计的 4 个原则：高性能低成本实现、支持多样化的网络实验、隔离实验流量和正常流量、支持设备制造商封闭其内部实现方法的需求。由于 OpenFlow 没有过于追求可编程性而忽略设备制造商封闭内部实现细节的需求，因此虽然主张开放网络设备的内部流表接口，但并没有受到设备制造商的抵制。

上述两篇论文对 OpenFlow 的早期发展具有重要影响。随着 OpenFlow 得到广泛研究，其不仅仅是在校园网上支持网络实验部署的方法，更为互联网体系结构的发展带来新的思路。

1.2 OpenFlow 现在面临的问题

OpenFlow 的发展目前面临很多问题，最重要一点是 OpenFlow 协议难以满足 SDN 内涵不断发展的需求。SDN 近年来得到广泛研究，其技术内涵也在不断拓展。特别是软件定义互联网体系结构和软件定义 Middlebox 联网等新概念对 SDN 数据面的需求不断变化。这使得最初面向实验网络部署而设计的 OpenFlow 协议难以支持。例如文献[3]提出了网络体系结构与网络基础设施解耦的软件定义互联网体系结构（SDIA）的思想，指出互联网基础设施（如路由器、交换机和 Middlebox 等）实现只有与具体网络体系结构无关，才能在基础设施不变前提下支持多种网络体系结构的部署。

然而 OpenFlow 协议规范制订时并没有考虑上述问题。例如为支持灵活的规则匹配，OpenFlow 即可采用类型/长度/值（TLV），也可采用偏移量/长度/值（OLV）的匹配方式。从软件编程角度 TLV 实现简单，从硬件设计角度 OLV 实现简单。

然而最终选择 TLV 还是 OLV 不仅仅决定规则匹配灵活性、实现复杂度以及与流水线处理模型的匹配能力，还代表是否将网络体系结构或协议的知识嵌入 OpenFlow 转发平面，是 OpenFlow 协议发展中的重大决策。然而从 OpenFlow 的 Maillist 中我们可以发现，由于缺少设备制造商的参与，在规范制订过程中，对选择 OLV 还是 TLV 的讨论十分简单，只有几个人参与，最后草草决定支持 TLV 而放弃 OLV。随着 2011 年 OpenFlow1.2 标准的推出，正式宣告 OpenFlow 无法支持可演进的体系结构基础设施。

由于 OpenFlow 标准制订过程多由网络应用提供商主导，设备制造商参与相对较少，导致 OpenFlow 协议标准难以符合设备制造商和网络运营商的利益。主要表现在：

（1）随着新版本协议规范的推出，OpenFlow 规定的处理模型越来越具体，规则匹配难度越来越大。与现有技术相比，OpenFlow 并没有简化网络设备硬件的设计，只在实用性和通用性之间做了折中。例如核心 MPLS 交换机只要对几十比特的标签进行查表，而 OpenFlow 交换机却要对几百比特的规则进行匹配。

（2）OpenFlow 破坏端到端的设计原则。传统互联网设计哲学认为网络中交换机和路由器的基本功能是做分组的交换和转发，是无状态的。而被认为对网络体系结构有害的 Middlebox 设备是有状态的，因为 Middlebox 在为互联网新型服务部署提供平台的同时，也在影响互联网端到端的特性。目前研究表明[4]，SDN 对提高 Middlebox 的可管理性具有重要意义，包括实现数据流的按需重定向和负载均衡等。OpenFlow 的发展使得网络路由交换设备（OpenFlow 交换机）和 Middlebox 间的界限变得模糊，例如在 OpenFlow 邮件列表中使用的典型 OpenFlow 规则[5]如下：

捕获从端口 1 来的报文（可能包含 Vlan Tag 也可能没有），目的地址是 192.168.1.1 的 80 端口（TCP 协议），将该报文的目的 IP 地址改写为 10.0.0.1，端口号改为 8080 端口（TCP 协议），并把其从端口 2 发出。

这使得研究人员担心，随着 OpenFlow 技术的应用，OpenFlow 的分组处理方式越来越向有状态的 Middlebox 靠近，互联网的端到端原则可能会被进一步破坏。

（3）由于 OpenFlow 标准制订过分依赖网络应用提供商，没有得到设备制造商和相关芯片设计商的充分支持，因此 OpenFlow 设备，特别是芯片的研发缓慢。OpenFlow 虽然被誉为“网络的 X86 指令集”，但目前网络的基础设施并不支持 OpenFlow，开放网络基金会也只能成立 FAWG 工作组，研究如何在传统网络设备上支持多流表的 OpenFlow。其基本思路是设计一个硬件抽象层（HAL），先支持 OpenFlow 在传统硬件上运行，直到能够支持 OpenFlow 的网络设备硬件出现为止。

2 SDN 数据面研究

目前关于 SDN 数据面的研究和反思主要体现在两个方面：一是如何有效与 MPLS 结合，利用 MPLS 在简化

交换规则和多协议支持方面成功的经验；另一方面是在实现上如何利用飞速发展的多核处理平台，解决OpenFlow硬件支持不利的问题。

2.1 SDN与MPLS

作为目前SDN主要的数据面抽象，OpenFlow主要面临规则匹配复杂性等问题，因此可以借鉴MPLS的设计思想。

因为MPLS最初设计主要为在IP中引入了ATM，解决的两个问题正好是目前OpenFlow发展中遇到的难题，即：(1)提高转发速度。MPLS只在网络边缘分析IP报文头，而在网络核心的转发只需简单的查找固定长度的标签表，简化了处理复杂性。(2)MPLS在无连接网络中引入连接模式的特性。通过生成标记交换面将选路和转发分开，因此支持IPv4、IPv6和IPX等多种协议。

随着专用集成电路芯片(ASIC)技术的发展，路由查找速度已经不是阻碍网络发展的“瓶颈”。这使得MPLS在提高转发速度方面不再具备明显的优势。但由于MPLS结合了IP网络三层路由和二层交换的机制，使得其能够容易地实现IP与ATM、帧中继等层网络的无缝融合，并为流量工程(TE)、虚拟专用网(VPN)、服务质量(QoS)等应用提供性能更好的解决方案。

在网络基础设施与网络体系结构分离的思想指导下，网络基础设施中的硬件应该简单，独立于特定厂商的解决方案并且支持未来新的体系结构(Future-Proof)。文献[6]指出网络体系结构设计实际包含3种接口：(1)主机-网络接口，即主机告诉网络如何处理其发出的报文，信息主要通过报文头携带，包括目的地址信息，ToS信息等。(2)操作-网络接口，即网络管理员向网络注入策略的接口。(3)报文-交换机接口，即报文告诉交换机如何对其进行交换。传统网络没有区分主机-网络接口和报文-交换机接口，也没有专门设计操作-网络接口，目前SDN实现了独立的操作-网络接口，但没有实现主机-网络接口和报文-交换机接口分离。MPLS通过网络边缘与网络核心分离，实现了主机-网络接口和报文-交换机接口的分离，所以在SDN发展中，应该借鉴网络核心的控制与网络边缘的控制解耦的思想，网络边缘支持更多的网络功能，而网络核心相对简单。

目前的OpenFlow协议处于十分尴尬的地位，在通用性上无法满足网络边缘的需求，而用在网络核心则过于复杂。

2.2 SDN与多核平台

目前网络技术发展正处在一个转型的阶段，主要特点就是由基于多核平台的软件转发取代由ASIC主导的硬件转发。多核平台在近年来发展迅速，基于多核的虚拟机平台得到广泛应用。多核平台Hypervisor实现不同虚拟机之间的数据交换和平台的IO虚拟化，可作为距端系统最近的第一跳交换机。因此多核是实现主机-网络接口交换的主要手段，也可以通过软件编程扩展支持更多的功能。

2012年Intel公司推出Cave Creek平台和DPDK，对多核平台上网络处理的直接内存存取(DMA)、缓冲区管理、队列管理等性能进行优化，使多核平台在数据面网络处理的性能大大提升。

基于上述趋势，文献[7]提出未来网络边缘功能将由软件实现，而硬件ASIC主要在网络核心进行简单的基于标签的高速转发。而实现转型的使能技术就是逐渐成熟的多核平台，主要表现在：(1)软件转发平台是稳定的可扩展的，可以支持各种新的转发操作需求；(2)多核转发平台本身的性能在不断提高；(3)软件交换已经在目前的网络中普遍存在，每个虚拟机的Hypervisor实际就是一个软件交换机。

文献[7]指出在2012年，软件交换机的端口数目已经大于硬件交换机的端口数目。因此，在SDN数据面研究时，需要充分考虑多核平台对数据面实现机制的影响。

3 新的SDN数据面抽象

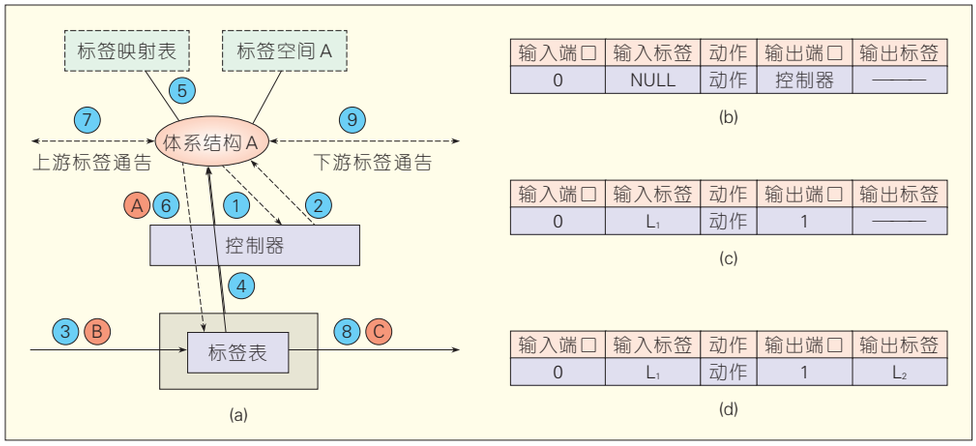
基于对OpenFlow发展面临的问题、MPLS成功经验和多核平台发展趋势的分析，我们提出了一种基于标签(label)的新型SDN数据面抽象——LabelCast。LabelCast的特点是基于标签的硬件转发和基于多核平台的可编程数据平面功能扩展。

3.1 标签交换原理

受MPLS转发机制的启发，我们发现除基于OLV的规则匹配外，使用弱语义定长标签的匹配也是实现协议无关网络基础设施转发的手段。文献[1]提出的新型转发思路为：软件的转发决策可以是基于语义分析的，即需要感知协议类型，而硬件转发可以是无语义的，仅仅根据软件转发的决策进行规则匹配即可。基于该思想，LabelCast的转发硬件只根据报文携带的标签对分组进行转发。而不关心分组是属于IPv4、IPv6甚至是未来的其他网络体系结构的分组。与OpenFlow类似，转发硬件对标签表查表不命中的分组送控制器处理。控制器(及其相关软件)根据分组具体语义决定分组的转发行为，并将该分组绑定到一个标签上，与MPLS类似，相同转发等价类的分组将会绑定到一个标签，标签和转发等价类的绑定通过控制协议传递。由于LabelCast的转发平面并不需要理解报文结构和标签的含义，因此支持未来新的体系结构。

基于Label的SDN交换的主要步骤如图1所示：

步骤1：在基础设施上运行体系结构A(例如IPv6体系结构)的程序，该程序向控制器注册，注册提供的内



输入端口	输入标签	动作	输出端口	输出标签
0	NULL	动作	控制器	———

输入端口	输入标签	动作	输出端口	输出标签
0	L_1	动作	1	———

输入端口	输入标签	动作	输出端口	输出标签
0	L_1	动作	1	L_2

▲图1 基于Label的SDN交换原理

容包括申请标签空间大小，IPv6分组的特征（如以太网帧类型域中IPv6对应的值）等。

步骤2：基础设施的控制器根据IPv6程序的要求，向其分配本地IPv6程序的可用的标签空间。IPv6程序负责该标签空间标签的管理，包括分配和回收等。

步骤3：交换机接收到第一个IPv6分组，其中标签域为空，此时交换机中标签表只有default表项，如图1（b）所示。

步骤4：由于该分组的标签域为空，交换机将该IPv6分组送控制器；控制器根据各种体系结构注册的分组特征，识别这是一个IPv6的分组，将该分组送IPv6程序处理。

步骤5：IPv6程序根据控制平面行程的转发规则（IPv6路由协议、配置的转发策略等），确定该报文的转发行为和输出接口。在确定转发规则时，既可以使用最长前缀匹配、也可以使用OLV和TLV形式的匹配。同时为该流的报文对应分配一个输入标签L_1。

步骤6：应用程序通过控制器将该标签及其对应的操作写入标签表，如图1（c）所示。

步骤7：应用程序同时将流与标签L_1的映射关系通知上游节点。

步骤8：该流的第一个报文根据标签表定义的动作转发到下一跳，由于输出标签为空，因此该报文输出时不携带标签。

步骤9：应用程序从下游接收到标签映射关系，即下游要求将该流与标签L_2绑定。

步骤a：应用程序更改标签表，更改后如图1（c）所示。

步骤b：从上游接收到该流的第二个报文，该报文已经在头部插入L_1标签。

步骤c：该报文直接查找标签表，命中，按照规定的动作处理，最后将标签替换为输出标签L_2发出。

LabelCast的交换机制与MPLS的主要区别包括：LabelCast的标签交换为端到端的处理，而MPLS的标签交换只在网络核心实现；LabelCast的标签分配由SDN的应用（不同体系结构的处理软件管理）实现，而MPLS由路由器路由系统实现。当然，在标签分配方面，LabelCast可以完全借鉴MPLS的标签分配方法，但是否可以直接使用MPLS的LDP协议还有待进一步研究。

3.2 可编程数据平面功能扩展

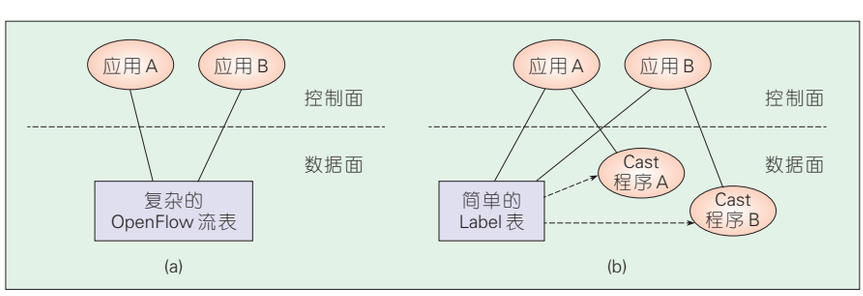
未来网络体系结构，如信息中心网络（ICN），可能要求网络交换节点支持数据缓存等功能。因此网络基础设施的数据平面必须支持可编程的功能扩展。支持数据面可编程功能扩展的实现方法有3种。（1）FPGA，性能高但可编程能力差。（2）网络处理器，综合考虑性能和可编程能力，但处理器核支持的数据和程序空间有限，且编程困难。（3）通用多核平台，可编程性好，支持大的数据和程序空间。

综合上述分析，我们提出基于通用多核平台的可编程数据面功能扩展方案，即Cast扩展。

LabelCast和OpenFlow数据面实现方式的对比如图2所示。OpenFlow只向应用开放复杂的流表，而LabelCast将传统数据面分解为无状态的基于Label的快速交换和协议相关的Cast处理，并向应用开放转发硬件中的label表和多核平台的计算资源，应用可使用计算资源编写定义数据面处理行为的Cast程序，实现特定的数据面功能，如数据缓存，DPI、加解密等。当然，如何在数据平面上隔离不同的Cast程序，对每个Cast程序使用的计算、存储和网络资源进行有效的计量，是下一步需要研究的问题。

4 结束语

本文对SDN的数据面抽象进行



▲图2 LabelCast和OpenFlow转发面抽象的比较

了重新思考，分析了目前OpenFlow协议面临的问题，通过借鉴MPLS的成功经验和近年来多核处理平台在网络数据面处理应用中取得的进展，提出了一种新的SDN数据面抽象——LabelCast。

LabelCast利用标签交换机制可以解决复杂规则匹配问题，采用Cast程序扩展机制可以解决转发面的功能可编程问题。本文的研究工作还是初步的，很多关键技术还没有触及，我们将在下一步研究中进一步深入分析。

参考文献

[1] CASADO M, KOPONEN T, MOON D, et al. Rethinking packet forwarding hardware [C]// Proceedings of the 7th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets'08), Oct 6–7, 2008, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2008:6.

[2] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2):69–74.

[3] RAGHAVAN B, KOPONEN T, GHODSI A, et al. Software–defined Internet architecture: Decoupling architecture from infrastructure [C]//Proceedings of the 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets'12), Oct 29–30, 2012, Seattle, WA, USA. New York, NY, USA: ACM, 2012:43–48.

[4] SEKAR V, EGI N, RATNASAMY S, et al. Design and implementation of a consolidated middlebox architecture [C]//Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'12), Apr 25–27, 2012, San Jose, CA, USA. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2012:24.

[5] OpenFlow–spec:Flexible match, flexible action[EB/OL]. [2013–05–15]. https://mailman.stanford.edu/pipermail/OpenFlow–spec/2011–April/001715.html.

[6] CASADO M, KOPONEN T, SHENKER S, et al. Fabric: A restrospective on evolving SDN [C]// Proceedings of the 1st workshop on Hot topics in software defined networks (HotSDN '12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA:ACM, 2012:85–90.

[7] SHENKER S. Software–defined networking at the crossroads [R]. Berkeley, CA, USA: University of California, Berkeley Colloquium on Computer Systems Seminar Series (EE380), 2013–05–15.

作者简介

孙志刚，国防科技大学博士毕业；国防科技大学计算机学院网络与信息安全研究所研究员；主要从事新一代互联网体系结构和高性能网络交换设备研制；已主持完成基金项目5项，获得发明专利7项，发表论文40余篇。

吕高锋，国防科技大学博士毕业；国防科技大学计算机学院网络与信息安全研究所助理研究员；主要从事高性能交换技术、数据中心网络、新型互联网体系结构和SDN方面的研究；已发表12篇论文。

陈一骄，国防科技大学博士毕业；国防科技大学计算机学院副研究员；主要从事高性能路由器和新型网络体系结构研究；已发表论文10余篇，获得专利授权3项。

综合信息

工信部确立2018年两化深度融合目标 中国两化融合发展水平指数达82

2013年9月9日消息，工业和信息化部下发了《信息化和工业化深度融合专项行动计划（2013–2018年）》（以下简称"计划"）计划要求深入彻底落实党的十八大精神，着眼转变经济发展方式的长期目标，围绕稳增长、调结构、促改革、惠民生的工作重点，全面提升企业竞争能力，拓展战略性新兴产业发展空间，打造中国工业经济升级版。

根据计划，中国将力争到2018年，两化深度融合取得显著成效，信息化条件下的企业竞争能力普遍增强，信息技术应用和商业模式创新有力促进产业结构调整升级，工业发展质量和效益实现全面提升，全国两化融合发展水平指数达到82。具体目标包括：

（1）"企业两化融合管理体系"得到全面推广。重点行业大中型企业两化融合水平逐级提升，处于集成提升阶段以上的企业达到80%，涌现出一批创新能力强、应用效果好、具有国际竞争力的优秀企业。中小企业应用信息技术开展研发、管理和生产控制的比例达到55%，应用电子商务开展采购、销售等业务的比例达到50%。

（2）信息技术向工业领域全面渗透，传统行业两化融合水平整体提升。基于信息网络的融合创新不断涌现，电子商务、工业云、大数据等新技术新应用驱动的新型生产性服务业蓬勃发展，企业间电子商务（B2B）交易额突破20万亿元。

（3）食品、药品等重点产品质量安全信息可追溯体系建设取得进展。民爆、危险化学品等高危行业安全生产水平得到提升。各行业能源利用效率显著提高，50%的重点工业用能企业数字能源解决方案应用达到较高水平，实现节能量5 000万吨标准煤。

（4）信息技术支撑服务能力显著增强。以数字化、柔性化及系统集成技术为核心的智能制造装备取得重大突破，在国民经济重点领域得到快速应用，重点行业装备数控化率达到70%。安全可控的信息技术产品配套能力和信息化服务能力明显增强，重点关键领域实现全面自主配套。

为顺利实现以上目标，计划还确定了"企业两化融合管理体系"标准建设和推广、企业两化深度融合示范推广等8项具体行动措施。（转载自C114中国通信网）

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.006
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130822.1604.001.html

SDN技术及其在移动通信网中的应用

SDN in Mobile Networks

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0027-005

段晓东/DUAN Xiaodong
于青/YU Qing
曹振/CAO Zhen
李晨/LI Chen
（中国移动通信研究院，北京 100053）
(China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

摘要： 提出移动分组域网关控制面进一步分离以及面向用户和业务的智能路由两种在移动核心网引入软件定义网络（SDN）技术的思路，对移动分组域架构的演进展开了进一步思考；分析了数据中心内部和跨数据中心网络中可能的SDN应用场景，预测了SDN短期应用的可能性；分析了网络服务虚拟化的应用场景和关键技术。

关键词： 软件定义网络；移动通信网；网络虚拟化

Abstract: In this paper, we describe two ways of introducing software defined network (SDN) technology into the mobile core network: 1) further separation of control functions from the forwarding gateway and 2) user and service oriented smart packet routing. We also discuss the near-term possibility of using SDN in a data center as well as between data centers. Finally, we discuss the use of SDN for network virtualization.

Keywords: software-defined networks; mobile network; network virtualization

软件定义网络（SDN）提出的初衷是在校园网中实验新型协议[1]，并由此诞生了控制与转发平面间的通信协议OpenFlow。虽然业界各方在实现SDN的具体方法上仍然有分歧，但产业界关于利用SDN打造新型创新网络的共识在逐渐形成。SDN的概念也从简单的实验新型协议发展演化成控制转发分离、软硬件分离、网络虚拟化等一系列网络能力软化重构的重要基础。

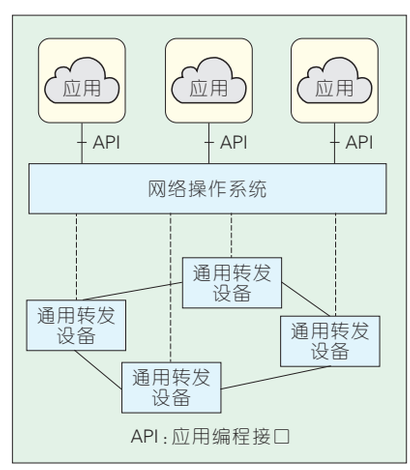
一个典型的SDN架构如图1所示。在这个架构中，网络操作系统[2]是SDN架构的核心功能，它由SDN控制器组成的集群实现。控制器系统的南向接口与组成物理或者虚拟网络的设备连接，北向接口通过提供应用编程接口（API）的形式给各类SDN应用，以满足不同网络需求，例如流量工程、路由调度、网络隔离等。以此构架为基础，Google部署OpenFlow协议解决了跨数据中心的流量工程，极大地提高了网络的利用率，是SDN技术应用的一个标志性事件。之后全球运营商纷纷进行了SDN应用的探索，涉及接入网、核心网和数据中心网络，大量最佳实践随之涌现。

本文聚焦于SDN与移动通信网络的结合，具体分析了移动通信网中能够通过SDN解决的问题，提出可能的应用方法，主要包含如下3个层面的内容：

（1）随着移动网络空口速率的增加和数据流量的爆炸性增长，如何降低网络成本、提高核心网的灵活性、减少移动网络新功能的上线时间，是移动核心网研究过程中需要重点解决的问题。本文针对这一问题提出了分组域网关控制面进一步分离以及面向用户和业务的智能路由两种设计思路。

（2）针对数据中心网络，本文分析了数据中心内部和跨数据中心网络中可能的SDN应用场景，针对市场上已有的OpenFlow控制器和交换机进行了功能和性能测试，分析了SDN短期应用的可能性。

（3）利用SDN能够打造虚拟、隔离、具有弹性能力的网络服务，以及把网络功能和服务以组件的形式提供给不同的网络租户，实现网络即服务（NaaS）的愿景。本文分析了网络



▲图1 SDN典型架构

收稿日期：2013-07-17
网络出版时间：2013-08-22
基金项目：国家科技重大专项（2014ZX03002004）

服务虚拟化的应用场景和关键技术。

1 SDN在移动核心网中的应用

高流量是未来移动网络发展所必然面临的挑战。在2G/3G时代，移动数据业务流量尚没有被完全激发。而在LTE时代，高速率的无线接入能力将大大激发用户使用数据业务的需求。另外，移动网络发展还面临业务数量和种类繁多、部分业务友好性不可控、业务和流量具有不可预测性等挑战。

然而，传统移动核心网的设计、实现与部署规划性强，扩容及移动网络新功能引入时间长。根据实际运营经验，移动网络一种新功能引入的时间在3年以上，因为新网络能力的引入涉及到多个过程，包括标准方案的制订、厂商设备的产品实现、软硬件测试以及现网部署的规划和调整。

为提升网络部署的灵活性，缩短部署时间，同时也为寻求一种低成本扩容方式，应提升网络的软件化程度和可编程能力，进而提高管理的集中化程度和对业务的开放化程度。SDN技术的出现或将能在一定程度上克服移动核心网应对移动数据业务冲击的不利因素。

1.1 SDN在移动分组域核心网应用的两种设计思路

SDN在移动分组域核心网应用有两种设计思路：

（1）功能重构——控制功能和转发功能的分离

移动核心网的系统架构演进-网关（SAE-GW）设备既提供用户面数据的路由转发功能[3]，也提供地址分配、承载控制、计费等功能。随着移动数据流量的急剧增长，低成本扩容成为SAE-GW设备演进的重要需求。从硬件平台的角度来看，目前SAE-GW设备厂家采用不同的硬件平台和软件实现，具有较高的设备采购成本。另外，从新的网络能力部署来讲，设备能力增强均依赖于原有厂家进行软件升级，甚至硬件升级，部署成本高，部署时间较长。

控制和转发分离原理图如图2所示。借鉴SDN的思想，可以将SAE-GW中较为单一的数据包转发功能独立出来，由SDN三层架构中的转发面设备承担。SDN控制器实现转发面设备的管理及包转发策略的下发，SDN最上层的一个或多个应用（APP）实现SAE-GW中的地址分配、承载控制等功能。这种功能重构方式一方面可以促进转发面设备的通用化，降低网络部署的成本；另一方面分离出的、软件化的转发控制以及基于转发控制的软件化的网元功能又提升了移动网络功能扩展及组网的灵活性。

为了实现控制功能和转发功能的分离，仍有一些问题有待解决。例如，转发面设备可以基于通用平台采用软件方式实现，也可以基于专有硬件实现的转发面设备实现，前者具有较强的扩展性，但是转发性能较弱，后者具有较高的转发性能，但是扩展性较差。又如，如果考虑在SAE-GW中加入深度包检测（DPI）功能，那么SAE-GW中DPI的实现方式有两种思路，一种是由转发面设备承担，可较容易和直接地实现基于用户和业务的流量处理策略，但是对转发面设备的要求也较高；另一种是由控制面软件实现，降低转发面设备的要求，但是增加了包在网络中转发的次数。诸如上述这些问题，目前业界已有公司在进行相关的测试验证工作。

（2）网络智能能力的灵活组合——面向用户和业务的智能路由

随着移动数据流量的迅猛增长，运营商正在探索做好流量经营之路，以提升数据流量的收入。对移动网络而言，需要不断构建新的网络智能能力，以服务于流量经营。这些能力包括：流量的识别和分析、内容缓存、协议优化、视频优化、页面适配、流量压缩等。

为此，需要构建一个开放的架构，以提升网络功能增强的灵活性，降低网络功能部署时间及部署成本。面向用户和业务的智能路由原理图如图3所示。一方面，通过降低网络智能能力之间的耦合关系，实现智能能力的独立部署和灵活扩展；另一方面，SDN控制和转发的分离实现了包转发策略的灵活构建与更新，借助SDN可以实现网络智能能力的不同组合业务链，以满足不同用户和业务数据流处理的不同需求。在开放架构中，如何科学地划分网络智能能力、设计不同组合业务链，高效地完成数据包所需处理，是目前业界关注的问题。

1.2 关于移动分组域核心网架构演进的思考

对于面向用户和业务的智能路

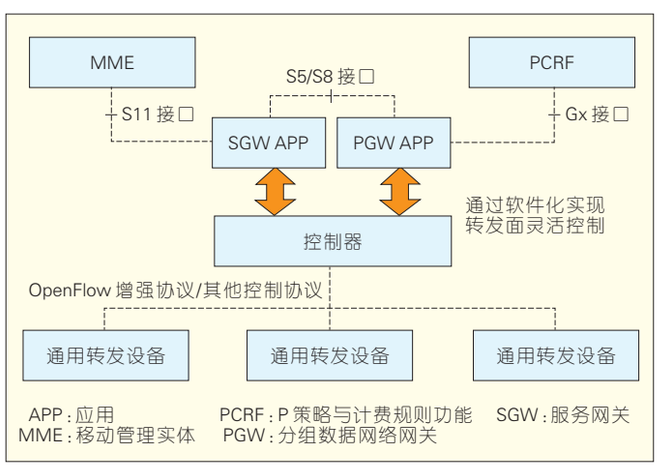
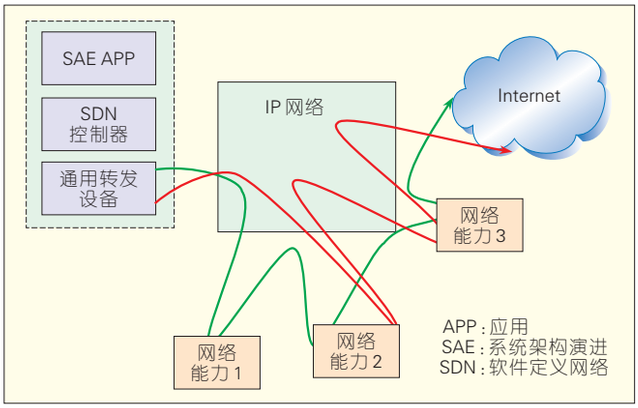


图2▶ 控制和转发分离



◀图3
面向用户和业务的智能路由

由的场景，其新增功能基本通过标准SDN架构来实现，并且其位于分组域网关功能之后，对分组域现有功能的影响不大。相反，控制与转发分离的场景却会引发新的接口定义问题。

服务网关（SGW）和分组数据网络网关（PGW）在用户面所采用的协议是通用分组无线业务隧道协议（GTP-U），目前OpenFlow等SDN南向接口协议均没有对GTP-U协议的处理功能，包括GTP-U的隧道建立、终结以及监控GTP-U隧道内部的数据流等。无论是采用专用硬件还是虚拟化软件方式来实现支持GTP-U处理的转发面设备，在控制器与转发面设备之间的接口都需要进行标准化。一种思路是增强OpenFlow等SDN南向接口协议支持下发GTP-U的控制流表，另一种思路是转发面设备将无法识别的GTP-U报文全部交由控制器来做处理。相比前者，后者的优势是不需要转发面设备支持位于应用层的GTP-U协议，也不需要升级南向接口协议支持GTP-U流表下发，但弊端比较明显，即在大流量下，控制器有形成“瓶颈”的风险。因此目前业界已有公司推荐采用第一种思路。

除南向接口外，北向接口也是需要解决的问题。在现有SDN架构中，北向接口采用API的方式实现，即应用调用控制器能力。这种方式是IT领域的常用方式，但对于移动通信领域，从实际操作来看，更倾向于采用标准化的接口，以便于互操作测试和故障定位，而这个接口的标准化目前仍是空白。

2 SDN在IP网络中的应用

2.1 云计算数据中心内应用SDN

云计算数据中心是当今网络标准发展最快、技术种类提出最多的领域之一。特别是在公众服务云中，采用虚拟局域网（VLAN）方式为用户提供数据隔离的承载网络已经无法满足不断更新的需求。一方面由于VLAN数目有限；另一方面，用户希望能够像租赁虚机、存储等资源一样，灵活地申请虚拟网络资源，包括IP地址资源、带宽资源、防火墙和负载均衡器等网络增值服务资源。

因此新型的云计算数据中心网络应该具备四大能力：

- 能够提供数量可扩展的隔离网络
- 能够为不同的租户提供可重复使用的IP地址资源
- 能够为不同的租户分配带宽可保证的虚拟网络
- 能够为不同的租户提供弹性的防火墙和负载均衡功能模块

SDN架构能够较好实现上述能力。SDN网络中南向接口主要采用OpenFlow协议，底层交换机基于流表转发，不同租户网络的隔离在控制器上进行区分，如控制器根据VLAN、IP、MAC、四层端口号等组合参数，将用户划归到一个逻辑隔离的网络中，并计算流表下发给相应的底层OpenFlow交换机。

在区分多租户重复IP地址等资源的问题上，集中控制的控制器网元可结合标签技术实现。

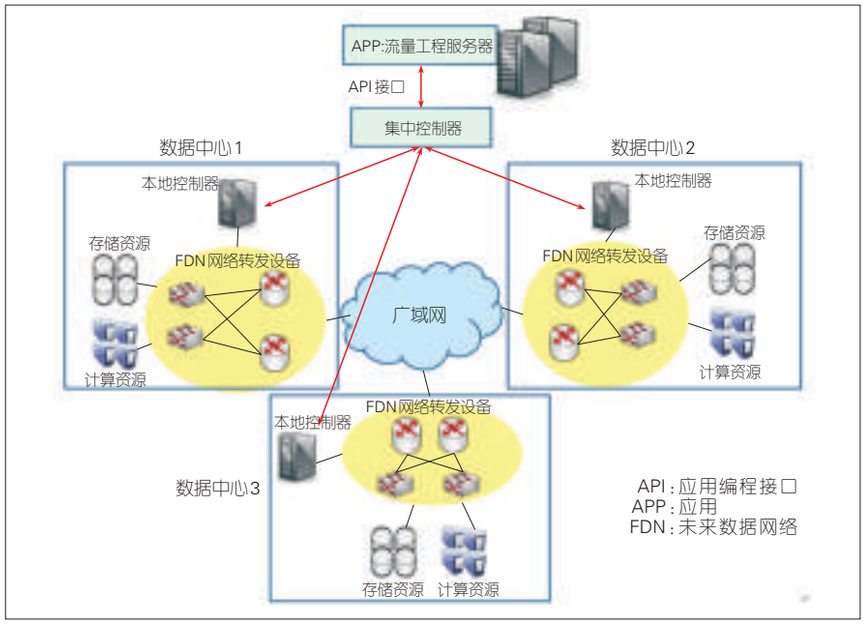
在为租户分配带宽方面，SDN架构具备优势：通过APP获取全局带宽利用情况、集中计算转发路径并经控制器下发至相关的交换机。在OpenFlow 1.3标准[4]中，也增加了“Flow Meter”参数，专门用于统计基于流的带宽利用情况。然而从目前主流厂家的测试情况看，OpenFlow交换机都不支持带宽参数获取能力，相关的路径计算APP也没有成型产品，还处于开发中。

在网络增值服务提供方面，SDN APP和控制器共同对流量流向的统一调度，实现业务链的功能，按需按序将流量调度至负载均衡器、防火墙等网元。同样，该部分应用目前较为欠缺。

2.2 跨数据中心应用SDN

数据中心流量分为南北向流量和东西向流量。南北向以用户访问数据中心内容为主，东西向流量包括主要指数据中心内或跨数据中心同步、备份以及CDN推送流量等。其中数据中心之间流量主要采用互联网承载。一方面，互联网流量突发性大的特征导致同步流量的网络质量无法保证；另一方面，按照现有的路由协议，无法做到基于链路负载情况进行路由。因此存在部分链路拥塞，整网利用率不高的问题。

SDN架构的流量工程组网方案可解决上述问题，并提高带宽利用率。SDN解决跨数据中心流量调度问题原理图如图4所示。SDN通过集中控制器感知链路带宽利用率，收集、分析全网流量分布情况，汇总整理后，通过API接口发送至流量工程服务器。流量工程服务器统一计算、调配可用链路，并生成转发路径下发



▲图4 SDN解决跨数据中心流量调度问题

给集中控制器。集中控制器(或本地控制器)转换成可执行流表下发给SDN网络转发设备。

目前，在厂家的方案中，OpenFlow交换机对带宽的统计能力不足和流量工程APP无成型产品造成了该方案难以大规模应用。

从具体的定量指标来看，我们通过实验室测试初步考察了一些厂家目前能够提供的OpenFlow交换机和控制器的性能。主要测试了两个指标，一个是OpenFlow交换机的流表容量，另外一个是流表的学习时间(秒/千条)。OpenFlow交换机只有满足基准值才具有实际意义(基准值参考目前数据中心交换机的能力)。

3 SDN和网络服务虚拟化

高效和低成本的云计算数据中心技术要求网络提供虚拟化的能力，一方面使得多个租户能够共享物理网络资源，利用隧道封装技术在物理网络上构建一张虚拟叠加网络，另一方面能够把网络的提供的服务虚拟化成一种服务提供给网络租户，提供弹性网络服务。SDN是一种灵活控制网络的方法，这种方法的出现使得网络服务的虚拟化能够更加便捷和低成本地实现。

3.1 网络虚拟化解决的问题

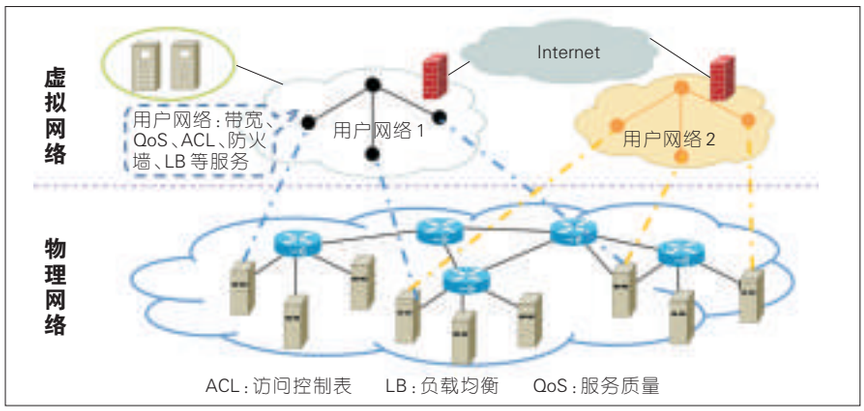
云计算数据中心给基础网络提出了很多技术挑战。首先是VLAN数量问题，传统的VLAN只能支持4 096个相互分割的网络，这个数量在公有云的多租户环境中显然是不够的，因此业界提出了VxLAN、NVGRE、STT等多种解决VLAN数量限制的方法。其次，数据中心大量的虚拟机的联网需求使得二层网络的规模持续增大，但是传统网络中二层网络的生成树协议无法支持多路径，浪费了大量的二层网络资源。再次，QoS能力的支持问题也日渐凸显，公有云租户的对外通信带宽和内部虚拟机服务器的带宽都需要有QoS的保障才能更好地为网络租户服务。最后，弹性的网络服务能力，例如防火墙、复杂均衡等网络能力如何动态适应租户的网络规模和连接，这些网络能力的提供不仅能给用户带来业务开展上的便利，也是提高云计算数据中心服务区分度的重要方法。

由于SDN提供了灵活控制网络的方法和协议，其目标也是要做成网络操作系统，以便灵活地调配网络资源，提高资源的利用率，与网络虚拟化的需求不谋而合，是实现网络虚拟化的利器。

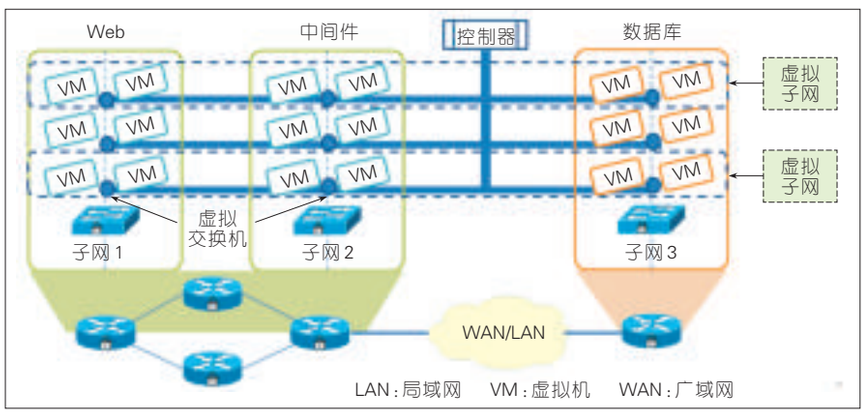
3.2 网络虚拟化的架构和关键技术

针对上述网络运维和服务提供的具体问题，网络虚拟化对应有几个层次。首先最基础的是网络基础能力的虚拟化，实现在物理网络上构建叠加网络，并且相互隔离。网络虚拟化愿景如图5所示。虚拟网络架构在物理资源网络上，不同的租户网络之间可能共享同一块物理资源，但是逻辑上分离。其次是实现网络服务的虚拟化，包括带宽、QoS、防火墙、负载均担服务等，一方面配合云计算服务提供对应的服务保证，另一方面把这些网络基本能力提供给数据中心的租户，避免用户重复建设。最后，网络虚拟化还能够给网络租户提供灵活动态的网络资源调度，租户的服务器能够根据网络当前的负载情况加载到不同区域的物理服务器上，同时能构建虚拟的局域网，还能够根据网络租户当前的业务需求动态的调整给其分配的网络资源。

弹性网络服务是云计算数据中心租户的切实需求。在图6中显示了一个网络租户动态加载服务的例子。在该租户的系统中，有Web服务器、中间件服务器和数据库服务器，而且与该用户的其他业务系统逻辑分割(VLAN或者VXLAN等)。用户在提交需求的时候不必关注每个对应的服务器当前分别加载到哪些物理服务器，调度过程将直接交给由SDN来完成。SDN根据当前不同区域的物理服务器的负载来确定虚拟机分别加载到哪些服务器上，然后由SDN控制器来给这些服务器构建起虚拟和逻辑上分割的网络。当该租户的系统需要更加复杂的增值服务时，例如防火墙、负载均衡等，可以通过SDN构建必要的虚拟网络连接。



▲图 5 网络虚拟化愿景



▲图 6 SDN 网络虚拟化实现租户隔离和弹性网络服务

进一步地，如果用户的业务量发展，连接请求从百万级上升到千万级，需要新增虚机和防火墙的处理能力也可以通过 SDN 来灵活调度。

实现网络虚拟化也需要多重技术。首先是虚拟叠加技术，目前有 VxLAN[5]、NvGRE[6]、STT[7] 3 种技术。这 3 种技术目前尚在 IETF 进行标准推动。这些技术克服了 VLAN 技术只能支持 4 096 个分割网络的限制。VxLAN 和 NVGRE 支持大概 1 600 万个 VLAN。STT 支持的 VLAN 数量更多，达 2^{64} 个。叠加技术解决了数据面封装问题，具体执行封装的实体在数据中心中应该是服务器上的虚拟交换机，这些虚拟交换机既能聚合虚拟机（VM）上的数据流，也能直接进行数据封装。除此之外，控制面需要利用 SDN 控制器集群来管理，VMWARE 为此设计了 OVSDB 协议[8]，网络服务提供商将根据业务和网络的具体情况选择不同的控制面和数据面的协议。

4 结束语

SDN 技术仍然处于应用初期，但是 SDN 所能提供的灵活富于弹性的网络服务能力正逐渐呈现出较大的应用价值。本文围绕着 SDN 在移动通信网络中的应用，分析了核心网、数据中心内部网络和跨数据中心网络互连场景中的 SDN 应用的场景和面临的问题，提出了可行的解决方案。SDN 产品距离运营商规模商用尚有一定的距离，需要业界共同努力，推动 SDN 应用的发展和普及。

参考文献

[1] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(2):69–74.
[2] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. NOX: Towards an operating system for networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(3):105–110.
[3] 3GPP TS 23.401. GPRS enhancements for E–UTRAN access [S]. 2012.
[4] OpenFlow Switch Specification, Version 1.3.0 [R]. ONF, 2012.
[5] MAHALINGAM M, DUTT D, DUDA K, et al. VXLAN: A framework for overlaying virtualized layer 2 networks over layer 3 networks [S]. draft–mahalingam–dutt–dcops–vxlan–03 (work in progress). IETF, 2013.
[6] SRIDHARAN M, GREENBERG A, VENKATARAMAIAH N, et al. NVGRE: Net work virtualization using generic routing encapsulation [S]. draft–sridharan–virtualization–nvgre–02 (work in progress). IETF, 2013.
[7] DAVIE B, GROSS J. A stateless transport tunneling protocol for network virtualization [S]. draft–davie–stt–01. IETF, 2013.
[8] PFAFF B, DAVIE B. The open vSwitch database management protocol [S]. draft–pfaff–ovsdb–proto–02. IETF, 2013.

作者简介

段晓东，南京邮电大学硕士毕业；中国移动通信有限公司研究院网络技术研究所所长、高级工程师；主要从事 IP 承载网络、下一代互联网、数据业务管理、移动互联网及智能管道的研发及管理工作。

于青，清华大学博士毕业；中国移动通信有限公司研究院网络技术研究所项目经理、高级工程师；主要从事移动网络演进、IP 多媒体子系统、分布式业务网、软件定义网络等方面的研究；已发表论文 10 篇，出版专著 1 部。

曹振，北京大学博士毕业，中国移动通信有限公司研究院网络技术研究所项目经理、高级工程师；主要从事移动互联网 IP 技术演进方面的研究，负责相关标准制订和跟踪；已完成 IETF RFC 标准 2 项，已发表论文 20 篇。

李晨，北京理工大学硕士毕业；中国移动通信有限公司研究院网络技术研究所项目经理；主要从事 IP 网络和数据中心组网方面的研究，负责 IP 骨干网、数据中心网组网方案设计及相关标准和技术的跟踪、研究和标准制订；已主持完成中国通信行业标准 1 项、中国标准化协会研究课题 1 项；已发表论文 2 篇。

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.007
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130829.1616.003.html

基于软件定义的弹性智能边缘网络

An Elastic Smart Edge Network Based on SDN

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0032-006

唐雄燕/TANG Xiongyan
周光涛/ZHOU Guangtao
朱鹏/ZHU Peng
（中国联通网络技术研究院，北京 100048）
(China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要： 提出了一种基于软件定义的弹性智能边缘网络架构，以实现对用户接入和数据接入的灵活调度和智能服务。通过软件定义的边缘设备弹性组网，使得网络具备服务无中断、能力虚拟化、控制集中化等特点，从而为运营商降低网络建设成本、提升服务质量以及增强安全管控能力提供了技术手段。

关键词： 软件定义网络；网络虚拟化；弹性智能边缘节点

Abstract: In this paper, we propose anelastic, smart edge-network architecture based on software-defined networking. This architecture allows for intelligent service delivery and flexible scheduling of user access and data access. With this technology, the can be virtualized and centrally controlled. In this way, network construction costs are reduced, there are fewer network interruptions, QoS is improved, and security is strengthened.

Keywords: software-defined networks; network virtualization; elastic and smart edge

目前大数据服务已经出现了云化的趋势，越来越多的IT服务以云的方式来提供，各大运营商也开始基于云计算技术组建自己的超级数据中心，面向企业/公众用户提供资源出租/数据服务。在云服务的背景下，数据出现了集中化的趋势，从而使得网络格局以及网络流量的分布也发生了很大的变化。

随着数据日益集中到少数的超级数据中心，网络的数据模型从原有的泊松分布模型转化为无尺度网络模型。整个网络的架构也向着用户与数据、边缘与核心分离的方向发展，其中，边缘接入网络出现了用户中心和数据中心的双中心格局。核心承载网络负责不同的数据中心网络以及用户中心网络之间的数据交互。在用户中心侧，是传统用户接入的驻地网，主要根据用户的地理位置进行承建，负责将用户接入到运营商网络；在数据中心侧，是运营商或者业务提供商承建的超级数据中心网络，主要依据能源与土地资源最优的原则选址建设，负责数据的存储、计算以及处理。边缘汇聚层是非常关键的一个控制层次，在传统城域网中由边缘汇聚设备（如BRAS、SR、GGSN和xGW等）构成，负责将用户和数据服务统一接入到核心承载网，具有用户/业务控制、业务提供、业务监测及业务策略执行等重要功能。边缘汇聚层是连接核心承载网络与边缘接入网络的第一道门户，对于电信运营商而言，是实现用户和业务“永续连接”的纽带，实现多网“融合控制”的节点，实现流量“本地疏导”的缓存，实现控制“功能聚合”的平台。随着云服务驱动网络架构的变革，人们对IP承载网的边缘汇聚层提出了新的要求，需要进一步具备可靠、智能、开放、简单和绿色等特点[1]。

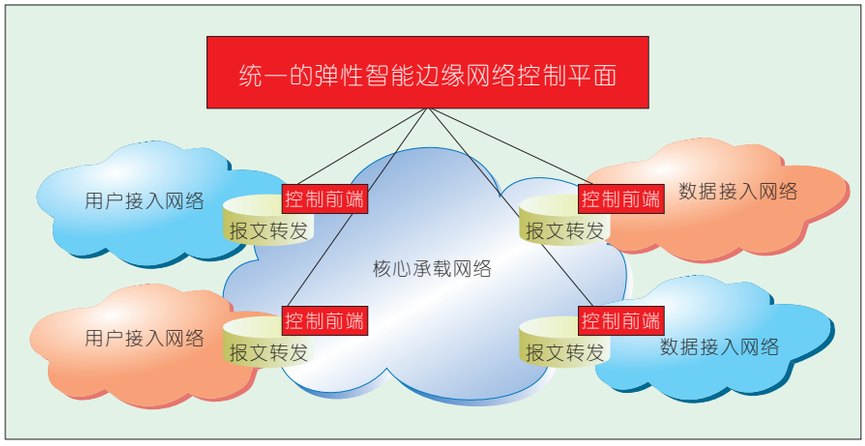
软件定义网络（SDN）是一种新型的网络架构，旨在将网络的控制平面与转发平面进行分离，并对底层网络进行虚拟化，实现可编程化控制，从而达到网络开放与敏捷创新的目的。SDN从架构上打破了原来依赖于专有网元能力形成的封闭、僵化的控制体系，一方面降低了设备生产的成本，同时简化了网络运维并提高了灵活运营的能力[2]。

SDN技术为边缘汇聚层的网络设备和组网架构提供了新的思路，如控制与转发分离、虚拟化、能力开放、动态重构以及集中管控等技术特点，使得边缘网络设备从传统上依赖于单台设备的转发和控制能力，逐渐过渡到由多台边缘设备协同组网提供服务[3]。本文将提出基于SDN技术的弹性智能边缘网络架构及其关键技术，致力于以低成本的方式提升网络服务的可靠性、可控性以及灵活性。

1 软件定义弹性边缘网络架构

弹性智能的边缘网络架构如图1

收稿日期：2013-07-08
网络出版时间：2013-08-29
基金项目：国家重点基础研究发展（“973”）规划（2012CB315806）



▲图1 基于SDN的弹性智能边缘网络架构

所示。边缘网络设备分布在接入网和核心承载网之间，作为边缘接入网络与核心网络的边界点，形成了边缘和核心网络分离的架构。边缘设备的硬件形态基于不同的转发能力要求以及部署的物理位置进行分类，可分成不同级别的用户接入边缘设备以及数据接入边缘设备。基于标准化开放的接口，边缘设备中的控制前端与集中的弹性智能边缘网络控制平面之间进行信息交互，从而构建统一的边缘控制网络。主要具备但不限于以下几点特征：

（1）弹性组网

实现边缘设备以统一资源池的形式进行集中管控，从而实现设备之间的相互备份、负载分担、资源共享以及虚拟化，能够提高可靠性，提升设备资源利用率，同时能够实现设备的动态扩容、绿色节能以及简化运行维护。

（2）智能管控

实现对业务、用户以及网络状况的深度感知及精确掌控，更好的支持网络能力开放、流量监测、策略控制等技术在SDN架构下的演进和实现，从而能够根据优先级策略，动态调整用户及业务的服务质量并实现差异化的计费，以满足用户及业务多样化的需求。

（3）边缘扩展

实现边缘网络节点的功能按需扩展，增强边缘网络和核心网络之数据处理的能力，比如，支持多业务、多网络以及多协议的接入，支持无感知的协议转发和映射，满足多个异构边缘网络的互联互通，支持用户中心与数据中心之间的内容缓存以及流量加速等新能力。

2 软件定义弹性智能边缘网络的关键技术

结合弹性智能边缘网络的技术要求，构建弹性智能边缘网络的技术大致可分3类：弹性化技术、智能化技术以及边缘控制技术，其中弹性化技术侧重于设备以及组网能力的扩展性与灵活性，智能化技术侧重于管理控制平面的功能性与开放性，边缘控制技术侧重于边缘网络与核心网络之间的协同性和互通性。

（1）弹性化技术

弹性化技术将多个边缘汇聚层设备组合在一起，使得边缘汇聚层具有能够根据用户的需求、实际的网络情况进行动态调整的能力，从而能够优化系统效率、提高系统可靠性。弹性化技术实现多个设备以及链路之间的协同和虚拟化。

弹性化边缘设备组网如图2所示。边缘设备弹性化组网技术主要体现在设备之间通过互联数据接口以及控制接口进行关联，其中，通过互联数据接口，支持边缘设备之间的数据迁移、流量调度以及负载分担，可采用上联链路、直连链路或者下联链路之间建立数据通道。通过控制接口，支持设备控制平面的配置收发、状态监测以及策略同步等，可采用数据通道共用链路或者独立占用链路进行配置。多台设备之间联合组网形成一个控制区域，不同控制区域之间弹性组网则可以通过不同域之间的控制接口以及互联接口之间互动来实现。

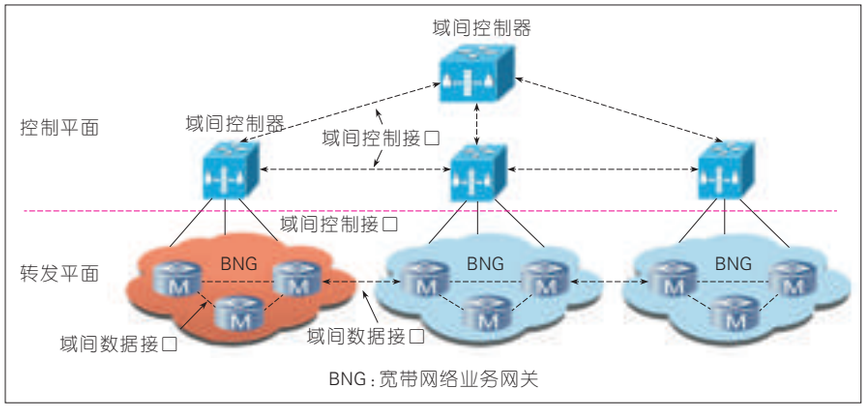
弹性化技术可采用分布式控制以及集中式控制方式，其中，分布式技术是指多个边缘汇聚设备以共享资源池的形式统一对外提供服务，比如地址资源、链路资源以及设备资源等，相互之间互为备份、负载分担，从而提高系统的可靠性，提升系统效率。虽然可以通过资源池的集中管理来简化运维，但对于单台设备管理控制平面仍然是独立维护，控制信息可以通过不同设备控制平面之间的同步接口进行交互。集中化组网技术进一步实现管理和控制平面的集中化，多台设备虚拟化为一台设备，从管理控制平面以及运维的角度来看都是一台设备，从网络路由的角度来看也呈现单一节点。目前业界提出的Pool技术、虚拟集群技术[4]以及Cluster技术等都具备了弹性化的技术特征。

基于SDN的弹性化组网可采用区域内集中化控制以及区域间分布式控制的结合形式，从而满足大规模组网的要求。通过多设备联合组网以及多区域之间协同组网，可实现边缘网络的数据转发能力扩展。

（2）智能化技术

智能化技术是采用标准化的开放接口，通过统一的控制平面实现边缘网络设备以及流量的智能调度，对用户和业务层面提供定制化的智能管道功能，从而能够提高网络的服务能力、简化运维管理，实现边缘网络的全面可控可管[5]。

智能化控制平面框架如图3所



▲图2 弹性化边缘设备组网图

示。统一的控制平面可以驱动转发平面实现对业务、用户以及网络状况的感知及精确掌控，进而根据优先级策略，动态调整用户及业务的QoS并实现差异化的服务能力。对于外部第三方应用开发商或用户则可以通过运营商提供的开放能力应用编程接口（API），开发出丰富多彩的网络应用，随时随地按需定制自己对于运营商管道的能力需求。例如未来某个时间段传输某业务需要定制要求的带宽及相应的QoS保障。

智能化技术主要包括对用户、网络以及业务的多维度感知、智能调度、动态策略以及能力开放等4个方面[6]。其中，多维感知主要通过与网元之间的接口交互，实现感知用户（即感知用户所处的位置、正在使用的业务等）、感知网络（即感知网络类型、当前网络资源使用情况等）和感知业务（即感知用户当前使用的业务类型、业务对网络资源的需求等）。智能调度指的是结合用户行为、业务行为以及网络资源负载情况，实现智能的网络链路建立、流量的优化疏导以及自动化的配置。动态策略指的是根据用户、网络、业务多维度定义不同的优先级和契约关系，动态调整用户所使用业务的QoS，根据不同的用户、时间、位置等信息调整业务的QoS，实现差异化的计费服务。能力开放指的是利用运营商拥有的网络带宽等资源进行指配和调度以及相应QoS控制的能力，通过开放接口对外提供可定制化的服务。目前，业界讨论的数据包检测（DPI）技术、融合策略与计费控制（PCC）框架、自动化配置技术以及能力开放接口等，都为基于SDN的边缘网络控制平面提供了技术实现基础。

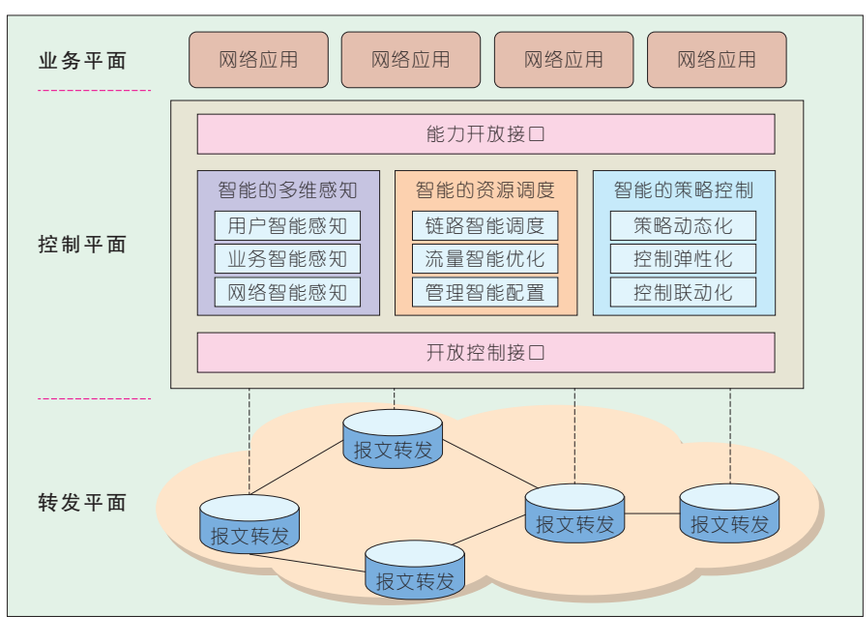
智能化技术为运营商提升网络运营能力提供了技术手段，解决目前电信运营商增量不增收、网络负载不均衡以及对用户、业务和网络状况掌控力弱的问题，而边缘汇聚层承担用户、业务接入的接口，是实现网络智能化控制的关键点，通过软件定义的方式构建统一控制平面，可以更好地满足用户需求定制化、资源调整灵活化以及服务提供快速化的要求。

（3）边缘控制技术

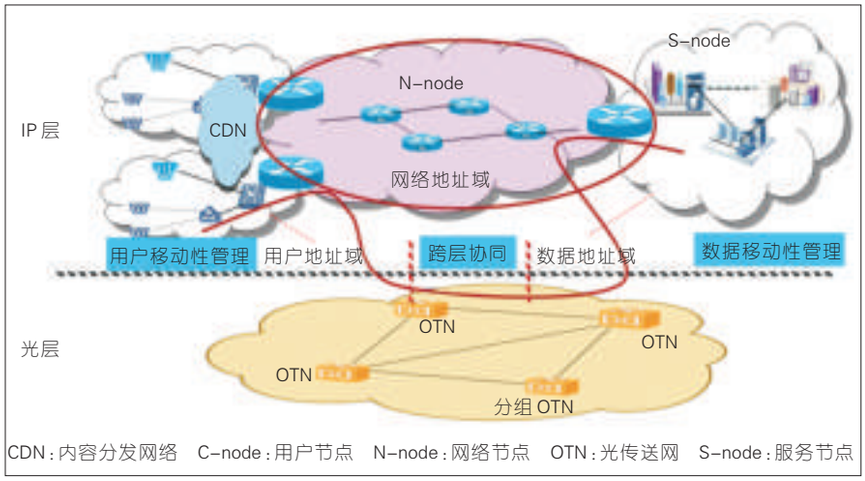
边缘控制技术主要利用边缘汇聚层实现用户网络、数据中心网络和核心承载网络之间的衔接，满足不同服务域之间以及不同层网络之间对数据协同处理的要求，从而提高网络的服务效率，实现网络资源的优化利用，尽可能的消除网络服务瓶颈。

边缘网络协同组网如图4所示。在核心承载网的外围有众多基于软件定义的边缘控制设备联合组网，包括两类典型的边缘接入设备：一类是用户边缘接入设备，实现用户接入网与核心承载网之间的连接；一类是数据边缘接入设备，实现数据接入网络与核心承载网之间的互联。作为边缘接入设备，不仅仅完成常规的数据转发功能，还可以完成不用区域网络之间的资源协同，比如用户和数据的移动性管理、网络加速、资源协同以及协议翻译等。

随着云计算服务的发展，数据流量的交互主要从主机与主机之间迁移至主机与服务器之间以及服务器虚拟机之间。边缘控制接入技术主要包括基于身份和位置分离的移动



▲图3 智能化控制平面框架图



▲图4 边缘网络协同组网图

性管理，基于包交换的无感知协议翻译，基于业务感知的边缘内容加速以及基于路径优化的IP与光层的网络协同等几大技术，其中：

（1）为了提供无间断的接入服务体验，在用户侧，用户可不受限于地点随时使用个人账号登陆网络，享受无间断的业务提供。而在数据层，大量的虚拟机在数据中心内部以及数据中心之间进行迁移，需要保证用户仍然能够访问迁移以后的业务。因此，基于SDN技术的边缘设备或者边缘网络需要实现对地址资源的统一分配和管理，实现身份标识和位置标识的分离[7]、用户多归属和流量工程等功能，从而满足用户以及数据移动性要求，保障迁移以后实现业务无中断服务。目前，业界讨论的主机侧以及网络侧的身份与位置分离技术，包括主机标识协议（HIP）、位置标识与身份标识分离协议（LISP）、下一代互联网路由架构（RANGI）、标识网等方案[8]，可以考虑在基于SDN的弹性智能边缘网中进行应用。

（2）为了减缓主机与服务器之间的交互流量对核心承载网的压力，需要考虑在用户边缘接入网络支持内容分发网络（CDN）加速功能。基于SDN控制平面的多维感知，能够有效利用热点流量分析结果，支持动态更新内容缓存，实现用户网络与数据网络之间数据访问的加速，提升用户的体验。

（3）为了解决接入网络以及核心承载网络分离下大颗粒度数据的传输效率和性能低下问题，需要考虑在边缘网络建立光传输层与IP路由层的资源协同机制，基于软件定义网络技术跨层的统一控制平面，可以按需进行链路资源的分配和调整，从而提高网络资源的使用效率，提高数据传输的质量。

（4）为了支持接入网络与核心网之间的解耦，不同的接入网以及核心网内部可以采用不同的数据传输协议，比如IPv4协议或者IPv6协议，边缘网络设备负责实现不同数据协议之间的转换。基于SDN技术，控制平面完成协议解析和协议映射，数据平面实现对协议无感知的转发，从而极大的提高了网络的扩展性，推动了异构协议网络之间的互联互通，有效消除了网络协议差异。

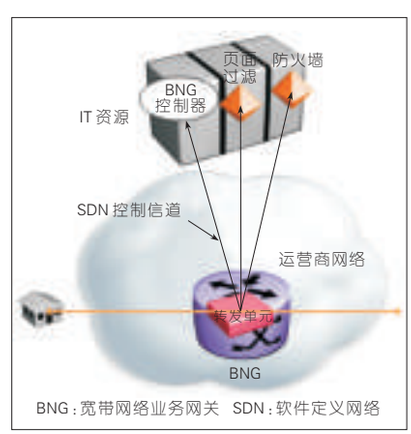
3 基于SDN的边缘网络标准化进展

随着边缘接入网络和与核心承载网络之间的分离趋势日渐明显，边缘网络作为网络解耦的边界位置，尤其在网络走向云化服务的时代，其关键作用日益凸显，近期关于基于SDN的弹性智能边缘网络部署及演进在业界引起广泛的关注，其标准化工作也在国际和中国标准组织中逐步开展[9]。

在ITU-T SG13中，目前正在针对基于SDN的智能型网络（S-NICE）功能架构进行研究，使得网络能够根据用户和应用供应商的要求提供智能化的服务，网络运营商可以根据这些要求分配指定的网络资源，并基于多维感知、流量优化和协同等技术进行动态的适应和调整。S-NICE不仅仅是支持智能化特性，也支持软件定义特性，它还要求在传输层、控制层和应用层具备SDN技术和开放性路由。同时，ITU-T SG13也正在开展基“Y.FNsdn-通信网络SDN框架”研究课题，充分讨论SDN在通信网路中的应用场景。基于SDN-BNG的框架图如图5所示[10]。SDN-BNG标准框架将智能控制功能从BNG中分出来，增强了边缘网络开展业务的灵活性。

此外，在ITU-T SG11中，SDN标准研究工作也全面启动，整体研究工作和SG13的网络需求和架构同时展开，互相补充借鉴。在基于SDN的BNG实现方面，中国包括中兴通讯、华为等主流设备提供商都开展了相关的研究项目，主要研究BNG设备上实现SDN的需求和架构以及BNG设备与SDN控制器之间的接口定义。

在中国标准方面，CCSA TC1确定行标研究项目《宽带网络接入服务器（BNAS）多机池组化网络架构和技术



▲图5 SDN-BNG标准框架

要求》，提出了BNAS多机池组化的网络架构和部署场景，重点研究BNAS多机池组化系统的网络架构和技术要求。行标研究项目《宽带网络接入服务器（BNAS）设备流量分析控制技术要求》针对宽带业务感知系统对宽带网络业务网关（BNG）设备、DPI/Policy Server/AAA等设备的具体技术要求，提出了宽带网络业务感知系统的网络部署场景，规范了宽带网络业务感知行为，明确了对宽带网络业务感知系统的技术要求及相互之间的接口。同时CCSA TC1专门成立了未来数据网络（FDN）特别任务工作组，主要负责SDN及网络虚拟化方面的标准研究工作。在行标项目《FDN应用场景和需求》文稿中，对SDN技术在运营商网络中的各种应用场景进行了详细的研究。其中，对基于SDN技术的城域网业务边缘的应用场景及具体需求进行了专门的讨论。提出了基于SDN技术，将多台边缘路由器设备虚拟成1台边缘设备，与用户相关的业务属性由FDN控制器进行配置和管理，边缘设备只实现用户接入的物理资源配置，从而可以实现高可靠性，并极大地简化设备的运维管理。

4 软件定义弹性边缘网络的应用场景

基于SDN的弹性边缘网络部署场景如图6所示。部署场景通过基于SDN的弹性边缘网络架构部署，改变了依赖现有网络独立边缘设备进行用户管理以及数据承载的模式。基于SDN的边缘设备以池组化或者虚拟化方式组网，可以对用户数据、虚拟局域网（VLAN）和地址资源统一规划，利用集中化的控制平面和网络能力开放，可以支持网络功能的不断扩展。以基于SDN的BNG为例，可以支持但不限于以下几种应用场景：

（1）任意接入

基于用户的位置信息，用户的登陆优先选择就近的BNG设备，当优先级高的BNG发生拥塞、故障，将主动切换至次优先级设备，实现用户对设备的无感知接入，即插即用，用户的状态在控制平面以及各边缘设备之间进行同步。

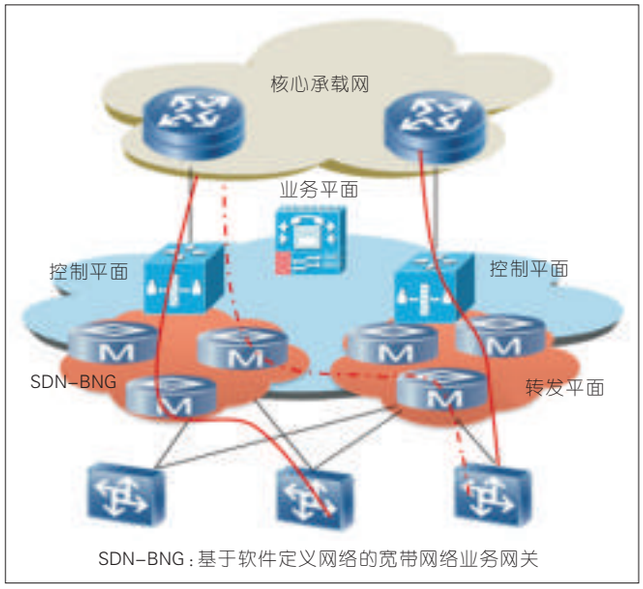


图6 基于SDN的弹性边缘网络部署场景

（2）故障保护

当其中一台边缘路由器出现故障而脱网之后，其他冗余的边缘路由器能够即时替代原有设备投入运行，用户信息不因故障而丢失，无需重建用户会话和重新下发用户属性，真正做到对最终用户的无感知切换。同时支持动态设备扩容，用户动态迁移，业务不中断。

（3）负载均衡

各个BNG的负载情况能够由集中控制器统一控制，如果有BNG在超过一段时间内流量持续超负荷，则将部分用户会话转移到流量负荷小的BNG上，达到平抑流量潮汐的目的，保证用户QoS。同时，结合网络负载情况，实现动态的流量调度，并依据用户以及业务的定制化要求，进行流量优化疏导。

（4）简化运维

基于SDN技术实现将多台边缘路由器设备虚拟成1台边缘设备，与用户相关的业务属性由网络操作系统（NOS）进行配置和管理，边缘设备只实现用户接入的物理资源配置。多台边缘设备以及相关的扩展设备，都可以虚拟成边缘路由器上的板卡，网管人员如同配置1台边缘路由器一样，实现统一配置和业务开通，并进行批量的软件升级。

（5）绿色节能

在一个控制域下的BNG组在网络闲时接入用户数很少的情况下，支持将域内所有在线用户迁移到一个当值BNG上，其他BNG进入休眠状态，降低设备功耗，达到节能目的，如果当值BNG设备发生故障或者用户数开始增加并超过一定阈值，则支持休眠BNG的快速唤醒，重新开始用户接入服务。

（6）协议转换

BNG转发设备不感知报文的协议类型，所有的报文转发业务将完全由集中控制器软件控制，对报文数据的读写访问均通过通用指令，由控制器指定数据的偏移和长度来进行。BNG转发设备支持任何现有的/自定义的基于数据包的协议，消除转发设备对协议的依赖，实现SDN的控制和转发分离更加彻底。

（7）能力开放

通过控制器的南向接口，对网络感知、策略控制、动态调度等能力有

限开放，可以及时响应来自用户侧对接入属性的定制化要求，同时依据业务的属性，进行流量疏导优化和动态缓存加速，并通过其他通信接口建立起与用户和业务平台之间的互动。

5 结束语

信息通信服务模式正在逐步向云服务迁移，并驱动大数据时代的到来。云服务导致的用户主机与服务器虚拟机之间的流量分布格局推动了用户接入网、核心承载网以及数据接入网之间的解耦，边缘网络的作用和价值愈加显著。SDN为构建弹性智能边缘网络提供了重要的技术思想和手段，基于SDN技术可以实现边缘设备的虚拟组网和集中控制，并能根据需求的变化实现网络功能的不断扩展，从而降低网络建设成本、提升服务质量并增强安全管控能力。边缘网络有望成为SDN最重要的应用领域之一，虽然相关研发和标准化工作还处在起步阶段，但已引起了设备制造商和运营商的广泛关注和高度重视，前景广阔。

参考文献

[1] JEN D, MEISEL M, YAN H, et al. Towards a future Internet architecture: Arguments for separating edges from transit core [C]// Proceedings of the 7th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets'08), Oct 6–7, 2008, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2008:6.
[2] 赵慧玲, 冯明, 史凡. SDN——未来网络演进的重要趋势 [J]. 电信科学, 2012,28(11):1–5.
[3] 王茜, 赵慧玲, 解云鹏, 等. SDN在通信网络中的应用方案探讨 [J]. 电信网技术, 2013(3): 23–28.
[4] 蔡德忠, 王伯剑. 运营商边缘网络虚拟化解决方案 [R]. 思科技术白皮书. 2011.
[5] 张继东. 智能管道的内涵及实施思路探讨 [J]. 电信技术, 2011(6): 11–13.
[6] 唐雄燕, 甘震, 周光涛. 构建精细化和差异化运营的智能网络体系 [J]. 中兴通讯技术, 2012, 18(1):8–12.
[7] FARINACCI D. The Locator/ID Separation Protocol (LISP) [S]. RFC 6830. IETF, 2012.
[8] 张超峰, 吴强. 从Internet走向标识网 [J]. 中兴通讯技术(简讯), 2011,15(12):4–7.
[9] 古渊. 软件定义网络(SDN)标准化进展 [J]. 电信网技术, 2013(3):53–56.
[10] FNSDN Y. Framework of telecom SDN (Software–Defined Networking) [C]//ITU–T SG13 Meeting, Feb 18 – Mar 1, 2013.

作者简介

唐雄燕，中国联通网络技术研究院首席专家，北京邮电大学兼职教授、博士生导师，工业和信息化部通信科技委委员兼电信传输专家咨询组副组长，中国通信标准化协会TC10副主席；主要专业领域为宽带通信、光纤传输、接入网、IP技术、下一代网络、泛在网等；已出版专著6部，发表技术论文150余篇。

周光涛，中国联通网络技术研究院高级工程师；主要从事下一代网络技术和业务研究工作，重点研究领域涉及未来网络架构研究、移动核心网络以及下一代互联网等；已发表技术论文60余篇，其中SCI、EI文章约有10篇。

朱鹏，中国联通网络技术研究院高级工程师；主要从事下一代网络技术研究工作，重点研究领域涉及未来网络架构研究以及下一代互联网等；已发表SCI收录文章约3篇，EI收录文章约有10篇。

综合信息

中国光通信器件行业现状堪忧 专家建言政府应加大扶持

2013年9月9日上午消息，在9月4—6日举行的“2013光通信技术和发展论坛”上，华中科技大学兼职教授、教育部长江学者特聘教授刘文表示，虽然在光通信的系统和线缆等领域，中国已经占据了很重要地位，但在高端光器件和芯片方面却非常落后，全部份额还不足整体市场的1/4。中国在该领域只能算是大国而非强国。

据刘文介绍，2011年全球光通信器件市场份额大概为62亿美金，激光器和激光器模块份额占到一半以上，激光器的地位是举足轻重的，但中国公司还未上榜；市场份额第二大的是ROADM，第三是EDFA。EDFA虽然约有一半以上是中国公司做的，但该模块的核心部件还需要进口。

刘文还以当前光通信领域最为炙手可热的100G系统为例进行了说明，“100G现在有两种技术：一种是并行，还有一个是相干，相干技术是主流，相干技术里面最贵的器件是载带开关器；100G模块现在中国也有公司可以提供，但是载带还需要进口，而且价格非常昂贵。”

刘文还对发展高端器件和核心技术提出了一些建议。他建议首先要正确认识中国光通信器件行业现状，不要为系统商和光纤光缆厂商在国际市场上已经取得了成绩而自满。其次要加大投入力度，希望科技部能够加大支持力度，多做几个8 000万元的项目。2011年底，科技部批复了一个总金额达8 000万元的项目，这也是通信光电器件行业有史以来支持力度最大的一次。另外，要引入竞争机制，刚开始需要多引入几家，然后再根据实际情况进行重点支持。对于企业的科研项目，政府应该要直接进行补贴。发挥产学研的优势，邀请高校老师直接参加科研项目，帮助企业解决一些技术难题。

另外还需要进一步突破核心技术和工艺，即材料生产和加工工艺。同时还需要成立行业联盟，将器件和系统厂商全部囊括在内，避免同质化竞争，避免产能过剩。他同时还建议需要出台鼓励替代进口产品的相关税收政策。 （转载自C114中国通信网）

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.008
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130830.1450.002.html

软件定义网络关键技术及其实现

Software-Defined Networks: Implementation and Key Technology

中图分类号：TN915.03; TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0038-003

汪军/WANG Jun
（中兴通讯中心研究院，南京 江苏 210012）
(Central R&D Institute, ZTE Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210012)

摘要： 提出了一种SDN控制器——ZENIC，并给出了其架构。在控制、转发两个层面上，ZENIC架构主要包括转发抽象层及驱动层、网络操作系统内核层、北向应用编程接口。ZENIC采用了统一的转发抽象层加特定转发驱动、接入和内联网络分层控制的特色架构设计，解决了多种设备接入和复杂网络控制的问题。

关键词： 软件定义网络；OpenFlow协议；数据中心；未来网络

Abstract: In this paper, we propose an SDN controller called ZENIC and describe its architecture. In the control and forwarding layers, ZENIC includes forwarding abstract layer, driver layer, network operating system kernel level, and northern application programming interface. A unified abstraction layer and specific forwarding drive combined with hierarchical control of access and Intranet can solve problems related to access of various devices and complex network control.

Keywords: software-defined networks; OpenFlow; data center; future network

自斯坦福CleanState项目孵化OpenFlow协议，在2009年业界正式提出软件定义网络（SDN）以来，业界已经有上百家企业正式加入到开放网络基金会（ONF）。SDN的产品及样机覆盖了SDN控制器、交换机、路由、虚拟网络功能部件等产品，应用场景覆盖了数据中心网络、企业网、校园网、光网络及业务边缘网络等。迄今为止，SDN的功能架构在不同的领域，出于技术和利益博弈两个方面的原因，业界尚无统一的认识。一般来说，ONF定义的转发、控制、应用3层架构得到相对广泛的认同。

1 SDN架构

按照ONF的定义，SDN分为基础设施层、控制层和应用层[1]，见图1所示。虚拟化在基础设施以及控制层两个层面上实现，前者实现设备级的虚拟化，比如一个物理交换机支持多个逻辑交换机；后者实现网络级的虚拟化，首先是SDN控制器将整个网络当成一个逻辑的超级交换机进行管理控制，其次将物理资源进一步根据端口、媒体访问控制（MAC）地址、IP地址段等信息划分为多个虚拟网络

遵照传统通信领域的惯例，在架构图中下方为南，上方为北，因此基础设施层和转发层之间的接口称为南向接口。ONF标准化的是OpenFlow协议，互联网工程任务组（IETF）正在制订路由系统接口（I2RS）协议。控制层和应用层之间的接口称为北向接口，业界主流实现的是基于超文本传输协议（HTTP）的RESTful接口，具体编程接口随应用场景不同而有所区别。

在更广义的SDN架构中，控制层之上还有业务编排层，主要实现SDN域间资源的统一管理、SDN网络和其他资源的统一调度，比如OpenStack+SDN的数据中心解决方案。

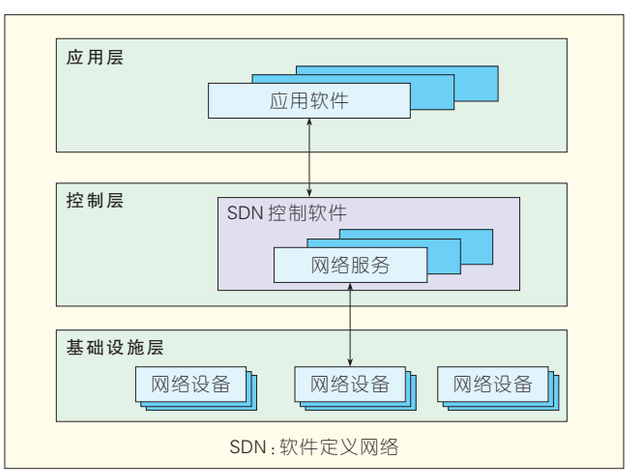


图1 SDN分层架构

收稿日期：2013-06-25
网络出版时间：2013-08-30
基金项目：国家科技支撑计划（2012BAH06B01）

OpenStack统一调度计算、网络和存储资源，相当于SDN的业务编排层。站在SDN的角度来看，控制层之上如何划分则是厂商解决方案、应用实现的具体行为，就如同传输控制协议/网间协议（TCP/IP）并不关心应用层进一步如何分层设计，统称为应用层。

站在整个网路架构的层面来看SDN，则业界存在不同的看法：

（1）SDN只进行区域性网络改造，可将SDN控制域看成一个超级设备。SDN并不改变原有的网络横向接口，边界网关协议（BGP）/多协议标签交换（MPLS）等仍然有效。

（2）SDN控制域间定义专门/增强的SDN东西向接口，将SDN作为整个网络的控制平面。

本文认为，第一种方案更加具有现实意义，利于网络的平滑演进。第二种方案中的东西向接口要么可以通过扩充现有的BGP/MPLS协议实现，要么可以通过北向接口在业务编排层面进行实现，如果要定义更加专用的SDN东西向接口，虽然有可能可以增强整网的能力，但是无疑也为部署增加了难度，业界正在探索之中。

2 ZENIC架构及控制面关键技术实现

现有来自于学术界的开源SDN控制器实现基于OpenFlow协议，整个转发模型也绑定于某个具体的OpenFlow协议版本[2-3]。对于商用系统而言，必须要考虑整个产品生命周期内协议接口的兼容，还要考虑不同应用场景的区别以及和多厂家、多协议接口的差别，因此SDN控制面必须设置一个兼容多版本OpenFlow、多种控制协议以及不同转发面能力的抽象层，我们称之为转发抽象层（FAL），在此之上为网络操作系统（NOS）核心以及应用层提供的接口是独立于具体的协议和硬件能力的。在OpenDaylight中，此层次称为业务抽象层（SAL）[4]。

本文实现一种SDN控制器——ZENIC，其架构如图2所示。图2自上而下主要包括协议栈、驱动和转发抽象层、NOS内核和应用层。

2.1 转发抽象层及驱动层

转发抽象层定义统一的转发控制接口，包括对抽象转发面的状态、能力、硬件资源、转发表、统计信息等进行读取/操作，相当于驱动的基类。同时转发抽象层还管理转发面驱动的实例，根据转发面接入时的基本能力协商加载不同的驱动实例，将转发面的控制连接绑定到相应的驱动实例。

每个具体设备的驱动实现转发抽象层的接口，完成不同接口协议、不同硬件能力到转发抽象层的统一适配。从控制面及其上层应用的角度来看，FAL提供了一个统一的转发操纵接口，但是由于各转发面的能力差别较大，应用对于转发面的操作存在失败的可能，因此FAL需要向应用提供转发面能力获取/协商的接口。

ZENIC已经实现对于OpenFlow 1.0/1.2/1.3的自适应协商。

2.2 网络操作系统内核层

NOS内核层是对网络、系统资源的管理，包括拓扑管理、主机管理、接口资源管理、转发表管理等，并管理物理拓扑、虚拟拓扑、转发表等构成的网络信息库。总体而言，内核层并无预设的网络转发逻辑处理，而是维护准确的网络拓扑、资源状态以及转发表的存储、合成，接受应用对于网络、资源状态的订阅以及应用对于网络资源、转发逻辑的操作。

拓扑管理的实现目前能够基于OpenFlow标准化的实现是基于控制器在链路上周期下发探测报文实现的，以太网一般是基于链路层发现协议（LLDP）实现。这样实现的好处是转发面完全无需感知，缺点是链路较多、检测定时器较短时，控制器的开销较高。另外一种方式是有转发面维护链路检测定时器，自行检测，将状态上报，这一实现方式的优点是控制面开销小，缺点是需要转发面具有一定的预设逻辑。

内核层不仅要维护网络节点、拓扑状态，而且也需要收集基本的主机位置、状态，从而可以给应用提供一个完整的网络视图，进一步做转发、业务的决策。

对于SDN控制器而言，网络虚拟化应该内置支持。虚拟化首先是转

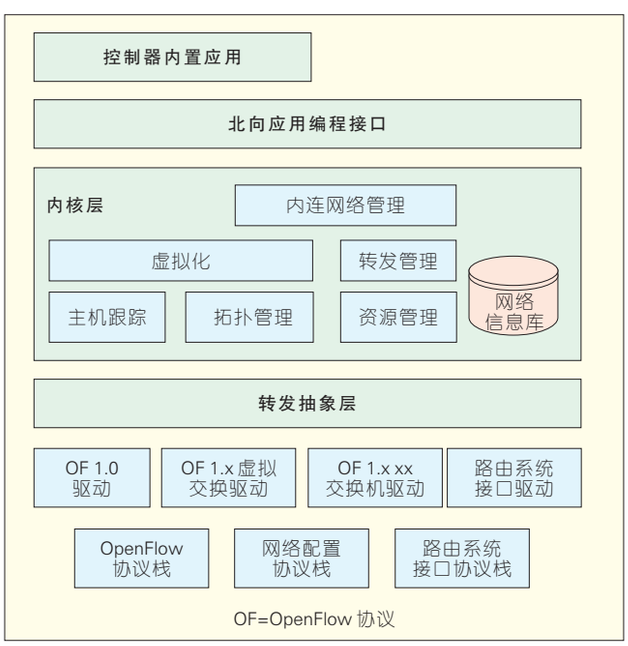


图2 ZENIC架构

发面资源的分区和隔离，比如按照端口、逻辑端口、主机MAC地址、IP地址段等进行虚拟网络的划分，其次是虚拟拓扑对于其上客户/应用的权限管理适配。

OpenFlow的流表模型以及对于交换机统一、扁平化的管理视图带来了很多问题，包括交换机硬件复杂化、不灵活、主机和网络需紧耦合[5]。在ZENIC系统中，将内联网络管理作为内核服务之一，解耦接入网络和互联网络。内核管理互联网络的封装格式，上层应用只需要决策SDN控制域内两个接入端口的位置和策略。内核计算出完整端到端路径，并在接入侧将转发决策映射到互联网络路径的封装标签。ZENIC支持多种互联网络封装格式，包括MPLS、虚拟局域网（VLAN）等，下一步将支持虚拟扩展的局域网（VXLAN）/通用路由封装协议（GRE）。这种接入-互联网络的模式，应用完全无需感知，专注于主机接入侧的策略。同时内连网络管理本身也可以开放接口，支持应用自定义的路由算法和策略。

2.3 北向应用编程接口

北向应用编程接口（API）在不同的应用场景中需求不同，对于封装的要求也有区分。如果将网络的原子能力暴露给应用，是有可能形成统一的API，但是由于缺乏封装和易用性，应用编程、实现的复杂度较高。比如有厂商实现的设备级开放API多达700多个，涵盖几乎所有协议和设备功能，但是对于SDN而言，将会面临至少两类应用，需求迥异：

（1）专业网络应用

订制化需求高，需要更加细节的API，对底层网络的操作操纵能力强，比如订制开发路由协议、订制进行精细化的流量调度。

（2）普通应用

将网络作为一种服务，只是请求网络为应用提供服务，并不关心网络细节。

对于后者，北向接口最好能封装几个模型和交互简单、易懂的服务接口，如向网络请求创建从交换机A端口1到交换机B端口2的一条1 Gb/s有带宽保证的通路，而不是由应用向路径上的交换机逐个下发转发表以及相应的队列配置参数。

还有一种北向接口的思路就是由应用定义自身对网络的需求和操作接口，网络厂商提供插件实现应用的网络接口。比较典型的是OpenStack的Quantum组件，其定义了网络的API，由各个厂商提供Quantum Plug-In来控制自己的SDN控制器或网络设备。此架构相当于把SDN的北向接口标准化工作往上推到应用，网络去适配应用需求。

两种思路各有利弊，由SDN定义北向接口比较理想化，试图统一解决所有问题，但是网络很难一一理解应用的需求，标准化的推进工作相对困难，而且易用性也很难保证；应用驱动的模式使得SDN落地更加容易，但是应用和多厂商网络之间的互通要较耗费更大代价。ZENIC提供基本的细颗粒度的底层API，同时提供封装后的虚拟网络API，目前已经提供OpenStack的Quantum Plug-In接入到OpenStack之中。

2.4 分布式处理算法

控制面本身的分布式架构以及SDN转发控制分离的架构带来了状态同步的额外开销，准确的SDN全局视图能够保证决策的精确性和实时性，对于负载均衡等应用而言可以提升资源利用率，但需更加频繁的信息同步，这大大降低了系统性能[6]。本文从设计上采用两种手段：控制器的分布式方案尽可能减少消息的复制；控制转发之间的状态同步由用户根据需求进行配置，只进行必要、够用的状态复制。

传统的集群网络系统控制面基本上是基于进程的分布式处理，比如各个不同的业务进程分布在不同的CPU上，但是一种进程仍然是单实例或少数实例，并行度受限。在单一业务进程突发负载的情况下，比如自治域间路由调整时的边界网关协议（BGP）进程就是“瓶颈”。对于SDN而言，由于控制的网络规模可能远远高于集群路由器，对控制面节点数量的要求更高，因此这种方法存在“瓶颈”不太可行。

分布式哈希表（DHT）算法提供了一个可伸缩的分布式数据存储/路由算法。对于传统应用不稳定网络的Log2（N）查找复杂度的算法，在数据中心、电信网络应用时，业界提出了多种增强的单跳算法，部分基于单跳DHT的增强型结构化查询语言系统（No-SQL）开源系统也已经过商用考验，包括Dynamo、Cassandra等，最早公开采用DHT分布式算法的SDN控制器是onix[7]，OpenDaylight项目近期也提出来采用Cassandra作为底层的分布式数据库系统。作者所在团队也实现了改良的单跳DHT算法[8]。

DHT算法基于一致性哈希，适用于键-值（Key-Value）存储模型，类结构化查询语言（SQL）的支持需要进一步封装。对于SDN控制器而言，拓扑信息是全局性的，不适合于DHT存储，而是需要进行额外的全局复制。与转发设备相关的信息组织以交换节点为单位进行分布式储存，可以满足基本要求，但是颗粒度较粗，不利于控制节点之间的负载均衡。主机信息可以按IP地址、MAC表两个维度进行分布化，更加均匀。

3 转发层面的转发抽象技术实现

OpenFlow 1.0提供的是一个单流表的抽象模型[9]，OpenFlow 1.1之后定义了一个多级流表的模型。I2RS以及部分厂商的开放接口给应用暴露的是一个路由信息库（RIB）之上的多种业务表，表之间隐含了协议规定的各种逻辑。OpenFlow给了应用/控制面对转发面最大程度的操纵能力，理

论上可以完全不受现有网络协议的限制，转发面可以是完全傻瓜化指令执行引擎，而其他开放API则是现有协议框架下的开放API，有严格的限定条件。

OpenFlow1.0非常简单，但是需要三态内容寻址存储器（TCAM）的支持，而TCAM价格相对较昂贵，同时其单表结构使得复杂转发逻辑的分解很困难。在现有基于专用集成电路芯片（ASIC）的交换机上，OpenFlow 1.0可以很容易地映射到ACL流水线之上，因此目前市场上支持OpenFlow的以太网交换机绝大多数都是只支持OpenFlow 1.0。

OpenFlow 1.x提供了多级流表模型[10-11]，增加了更多的表匹配字段和指令类型，能力越来越强，但是离现有交换机ASIC的能力越来越远。软件交换机可以容易地实现OpenFlow 1.x的多表模型。硬件交换机可以通过将自身的传统ASIC流水线进行一些必要的封装，形成多级流表上报给控制面，由控制面进行适配，只下发转发面支持的指令和表结构。这对转发面和控制器均提出了更高的要求。业界也有少数厂商推出了可配置TCAM流水环节的ASIC，这些将固定宽度的TCAM查表处理单元分解成更小的分片，比如每32比特TCAM是一个基本分片。应用可以灵活定义多个分片构成一级OpenFlow流表，从而支持了OpenFlow的多级流表模型。应用可以将L2交换、L3交换/路由、ACL等分解到不同的流表上实现，从而避免了超长单一流表关键字带来的不必要的TCAM开销。

4 结束语

SDN通过采用转发控制分离、集中控制的理念改造网络，试图将转发设备改造为简单的受控转发设备，将智能留在纯软件化的SDN控制器之中，使得网络的创新更加快速、简单，这带来了开放的产业链和新的技术变革的机会。本文描述了作者及其团队对于SDN相关关键技术的研究成果及SDN控制器产品实现架构，并阐述了各种对比方案的优劣势。

参考文献

[1] Open Networking Foundation. Software-defined networking: The new norm for networks [R]. White Paper. ONF, 2012.
[2] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. NOX: Towards an operating system for networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(3):105-110.
[3] NOX [EB/OL]. [2013-02-18]. http://www.noxrepo.org/
[4] Open daylight project [EB/OL]. [2013-02-18]. www.opendaylight.org
[5] CASADO M, KOPONEN T, SHENKER S, et al. Fabric: A retrospective on evolving SDN [C]// Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA:ACM, 2012: 85-90.
[6] LEVIN D, WUNDSAM A, HELLER B, et al, Logically centralized? State distribution trade-offs in software defined networks [C]// Proceedings of the 1th ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN'12), Aug 13, 2012, Helsinki, Finland. New York, NY, USA:ACM, 2012:1-6.
[7] KOPONEN T, CASADO M, GUDE N, et al. Onix: A distributed control platform for large-scale production networks [C]// Proceedings of the 9th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation(OSDI'10), Oct 4-6, 2010, Vancouver, Canada. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010:1-6.
[8] HU Yongsheng, WANG Jun, HAO Zhenwu, et al. A reliable searching and broadcasting scheme in large-scale structured peer-to-peer system [C]//Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT'11), Oct 28-30,2011, Shenzhen, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011:324-328.
[9] OpenFlow switch specification 1.0.0 [S]. Open Networking Foundation, 2011.
[10] OpenFlow switch specification 1.2 [S]. Open Networking Foundation, 2011.
[11] OpenFlow switch specification 1.3.1 [S]. Open Networking Foundation, 2012.

作者简介

汪军，南京航空航天大学硕士毕业；中兴通讯中心研究院系统架构部总工；从事网络运营、核心网产品研发、核心网平台规划以及下一代网络技术研究，主要方向包括数据中心网络、SDN。

综合信息

中国通信设备业1—7月 完成固定资产投资466亿元

工业和信息化部近日公布的1—7月电子信息产业固定资产投资情况显示：1—7月，中国通信设备行业投资增势明显，通信终端设备的新开工项目增长较多。据统计，500万元以上项目共完成投资466亿元，同比增长42.5%，高于2012年同期10.2个百分点。

数据显示，2013年前7个月，中国电子信息500万元以上项目共完成投资5 670亿元，同比增长9.5%。其中，通信设备行业完成投资466亿元，同比增长42.5%，高于2012年同期10.2个百分点；集成电路领域完成投资292亿元，同比增长47.8%，增速高于2012年同期23.9个百分点，并扭转了年初负增长的局面。

2013年1—7月，计算机行业完成投资413亿元，同比下降9.2%；信息机电行业完成投资931亿元，同比下滑11.3%；信息材料行业完成投资159亿元，同比下滑41.2%；电子元件和专用设备行业投资稳定，分别完成投资1 189亿元和703亿元，同比分别增长25.7%和28.6%。（转载自C114中国通信网）

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.009
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130905.1011.001.html

对SDN发展的探索

Exploration of SDN Development

中图分类号：TP393.03 文献标志码：A 文章编号：1009-6868 (2013) 05-0042-05

摘要：OpenFlow是一种支持网络创新研究的新型网络模型，该模型通过开放的流表支持用户对网络处理行为进行控制，从而为新型互联网体系结构研究提供新的途径。而基于OpenFlow的SDN，实质是对互联网现有技术的继承、发展和创新，它的定位是创造出新的分组数据网，实质性地改造和改变IP网，是网络层革命性创新的工具和手段。认为SDN技术目前还处于初步发展的阶段，还有很大的开拓空间。

关键词：软件定义网络；软件驱动网络；下一代网；未来网络

Abstract: OpenFlow is a new network model that supports innovative network research. With an open flowtable, OpenFlow enables a user to control the behavior of network processing and provides a new way researching new Internet architecture. The essence of an OpenFlow based software-defined network is inheritance, development, and innovation of existing internet technology. The goal of OpenFlow SDN is to create a new packet data network and substantively change the IP network. OpenFlow is a revolutionary tool for the network layer. SDN technology is still in its initial stage of development and there is still much work much to do.

Key words: software-defined networks; software-driven networks; next generation network; future network

蒋林涛/JIANG Lintao

（工业和信息化部电信研究院，北京 100191）
(China Academy of Telecommunication Research of MIIT, Beijing 100191, China)

- 基于OpenFlow的SDN是对已有网络技术的继承、发展和创新，它的定位是创造出新的分组数据网
- 北向接口的提出表明互联网界已经认识到业务层和传送层关联的必要性和重要性，它是未来网络的重要特征
- 第三方独立、权威的新技术评测、评估体系的缺乏，以及新技术推进、推广体系的缺乏，已影响到国家的创新能力和创新速度

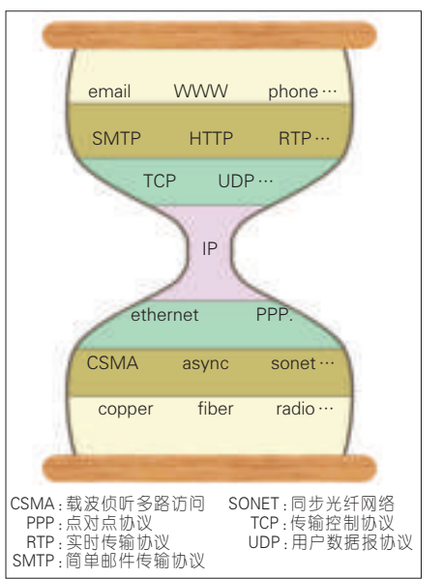
1 互联网的现状

互联网是以IP网为基础的，电信网与所有的大小专网（包括：军网、大、中、小型企业网、工业控制网等）都建立在IP网之上。IP网已经是国家信息通信的基础设施。40多年来，互联网取得了长足的进展，互联网技术的进展主要集中在业务和应用方面。在IP网技术方面，40年来尽管局部修改不断，但却没有实质性的改变，存在的问题没有得到很好地解决，这些问题已经成为互联网发展的瓶颈。图1是一张引用得十分广泛的图，它形象地指出IP网已经成为互联网发展的瓶颈。

2000年美国国防部明确提出：现有的互联网已经不能适应未来发展的需要，必须要设计新的体系来取代它。新的互联网必须解决安全问题、服务质量（QoS）问题和商业赢利问题。从2002年起，美国及世界各国都开始了对下一代互联网的研究工作。

2 OpenFlow的提出

互联网已凸显出太多亟待解决的问题，如：危险性高，恶意攻击、病毒、木马每年会造成上千亿的损失；过于脆弱，无标度的特性让整个网络可以在精心设计的少数攻击下很快崩溃；随意性强，对等网络（p2p）等应用的出现一度造成各大互联网服务

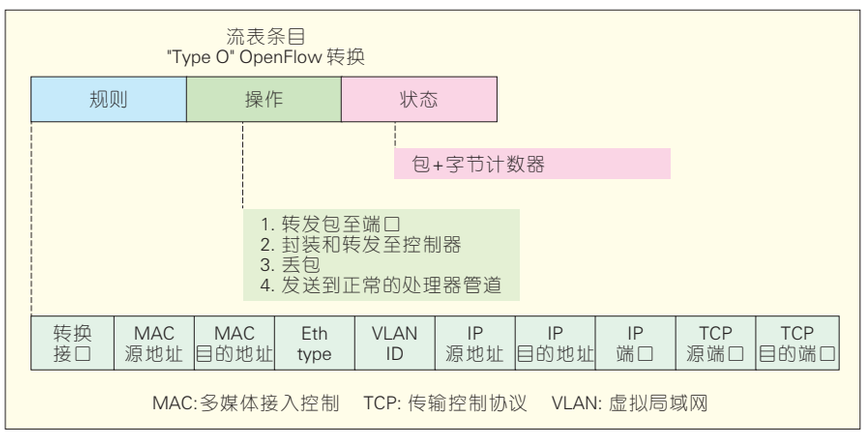


▲图1 互联网的现状

收稿日期：2013-07-28
网络出版时间：2013-09-05

提供商(ISP)网络堵塞,严重影响传统正常的访问;反应较迟钝,现代臃肿的路由机制不能支持快速更新,即便发现问题也无法快速反应,运营商只得忙于扩容[1]。

针对上述问题,美国斯坦福大学于2007年提出了OpenFlow。这是一种支持网络创新研究的新型网络模型,该模型通过开放的流表支持用户对网络处理行为进行控制,从而为新型互联网体系结构研究提供新的途径。在OpenFlow中,流表是一个重要的内容,流表中每一个条目包含3个部分:规则,操作,状态。流表的改动,可以生成新的网络。OpenFlow中的流表如图2所示。



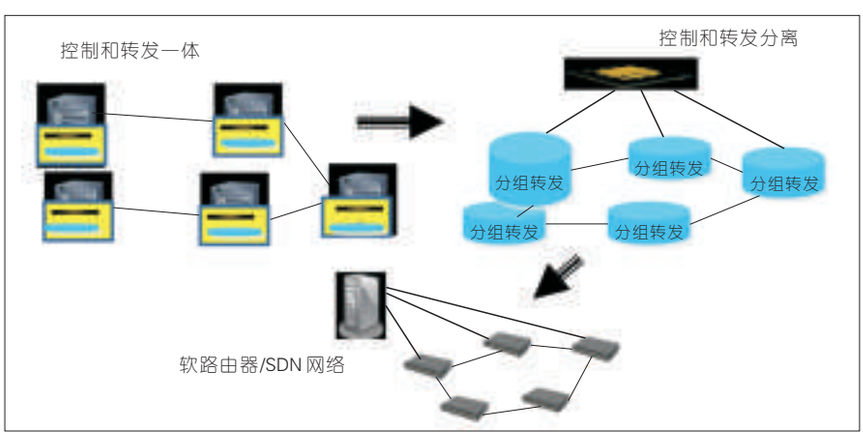
▲图2 Openflow中的流表(来自Stanford openstate项目)

OpenFlow研究组主要致力于5个问题的研究,分别为:是否继续采用分组交换;是否要改变端对端原理;是否要分开路由和包转发;拥塞控制和资源管理;身份认证和路由问题。OpenFlow研究组从2006年开始工作,预期到2014年可以完成,研究工作分3个阶段进行,计划的成果是一套网络研究的基础平台。从2007年到现在,OpenFlow已经在硬件和软件支持方面取得了长足的发展。2009年12月,OpenFlow规范发布了具有里程碑意义的、可用于商业化产品的1.0版本。如OpenFlow在Wireshark抓包分析工具上的支持插件、OpenFlow的调试工具(liboftrace)、"OpenFlow虚拟计算机仿真"(OpenFlowVMS)等也已日趋成熟。OpenFlow提出后得到学术界和工业界的广泛关注。

3 软路由器和SDN

目前SDN是各国网络界的研究热点,其外延也越来越泛化。提到SDN一定也会提到其控制与转发相分离的特征,其实控制与转发相分离早就存在,最典型的是存在于软路由器中。从外形上来看,软路由器和基于OpenFlow的SDN是十分相似,图3是两者的外形图。两者外部特征看上去并无差异,但实际上却有着本质的区别。软路由器是普通路由器在物理形态上的简单改变,一个普通的路由器是由主控板(CPU板)、总线和数据转发板组成。主控板负责路由计算,产生路由表和转发表;主控制板通过总线将转发表传给数据转发板;然后数据转发板再根据分组中的目的地址实现转发。在控制和转发一体的普通路由器中,主控板仅有1套软件,该软件主要用于负责计算本机的路由,产生本机的路由表和本机所属数据转发板的转发表。软路由器做的工作是:一方面将主控板从路由器中分离并集中起来,成为路由控制设备;另一方面把数据转发板变成数据转发设备,路由控制设备通过网络将转发表下传给数据转发设备。通过这种变化,就成为控制与转发相分离的软路由器。可以看出软路由器与普通路由器相比,实质没有改变,只是物理形态上发生改变[2]。

在1个基于OpenFlow的SDN的控制器中有1套基础软件,主要是用于进程调度、收集网络设备(数据转发设备)的连接状态信息和建立网络的基础拓扑关系,而不用于计算路由,不产生本网络(SDN)的路由表和本网络所属数据转发设备的转发表。在不加载路由或其他网络软件前,网络是不会工作的。当加载网络软件后(例如:加载全套IPv4的路由网络软件,当然也可以是其他网络软件或者是完全创新的软件),它就可以启动相应的进程来运行这个软件,计算路由,并产生本网络的路由表和本网络所属数据转发设备的转发表(假如该网络软件是IPv4/6的网络软件),然后通过OpenFlow协议与相关网络,



▲图3 软路由器和SDN

将转发表发给数据转发设备。如果流程只到此为止，那么OpenFlow的SDN与软路由器并无本质上的区别。基于OpenFlow的SDN与软路由器的本质区别是：该网络软件可以不是IPv4/6的网络软件，而是一个完全新的网络软件；它的分组报文的报头中的字段是可以自定义的，字段的作用也是可以自定义的；生成的是流表而不是简单的转发表，可以用于控制整个数据转发设备也可以控制部分数据转发设备（虚拟数据转发设备）。在一个基于OpenFlow的SDN的控制器中可以同时运行多种网络软件，形成多种性能和习性不同的网络，从而为网络发展提供了很好的想象空间和门槛很低的开发环境。

4 SDN的机遇和挑战

4.1 目标和概念

目前SDN的目标扩展为：简化网络操作，提升网络性能，提供网络创新平台，研究下一代网络技术。SDN目前可以是：软件定义网络（Software- Define Networks）、软件定义组网（Software-Define Networks）或软件驱动网络（Software-Driven Networks）的缩写形式。

SDN可以分为两类：其中一类是用于创新网络，即基于OpenFlow的软件定义网络，从本质来说它的真正用途应该是软件定义流表，并下发流表生成新的网络；另一类是用于简化网络操作，提升网络性能，包括软件定义组网和软件驱动网络。

网络发展的过程有的是做加法，有的是做减法。做加法，就是原有保持基本不变，要增加能力，就需要原有的基础上增加复杂度。到目前为止，对IP网我们一直在做加法，把一个原本非常简单的IP网变成为目前无比复杂的IP网，原本仅1万行源代码的路由器变成超过1 000万行源代码的路由器。做加法的根本原因是网络没有顶层设计，想到一点加一点，一般来说加法对局部是有效的，对全局往往是无效的。举一个例子来说，对IP网做的最大的一次加法是多协议标签交换（MPLS），实际上MPLS的基本理念和IP网的基本理念是相反的。IP网的基本理念是要做大网，网络必须是不面向连接的，所以IP网建立在不面向连接技术之上的。IP网取得了巨大的成功，但同时不面向连接也带来很多问题，如服务质量问题、安全可信问题等。为了解决IP网的问题，MPLS则走了一条完全相反的路——采用面向连接的技术，结果是路由器中既有不面向连接的IP网络协议，又有面向连接的MPLS网络协议，复杂度大大增加了。MPLS在局部范围内使用的确能解决一些问题，但范围一大效果则较差，这就是做加法的结果。对于IP网来说，它做了无数的加法，网络协议越来越复杂，网络越来越低效。

做减法则要困难得多，但同时也将有效得多，甚至可能会实现突破性的发展。要做减法，首先需要非常清楚网络的需求，并根据需求做好网络的顶层设计，只有拥有顶层设计才能做减法，否则就不知道如何减、减什么。当然做减法需要对网络技术有深入的理解和研究，才有可能在顶层设计指导下提出切实可行的方案。

4.2 SDN的分类

在ITU-T SG13的下一代网络（NGN）体系中首先提出了网络的北向接口。图4给出了NGN的体系架构。

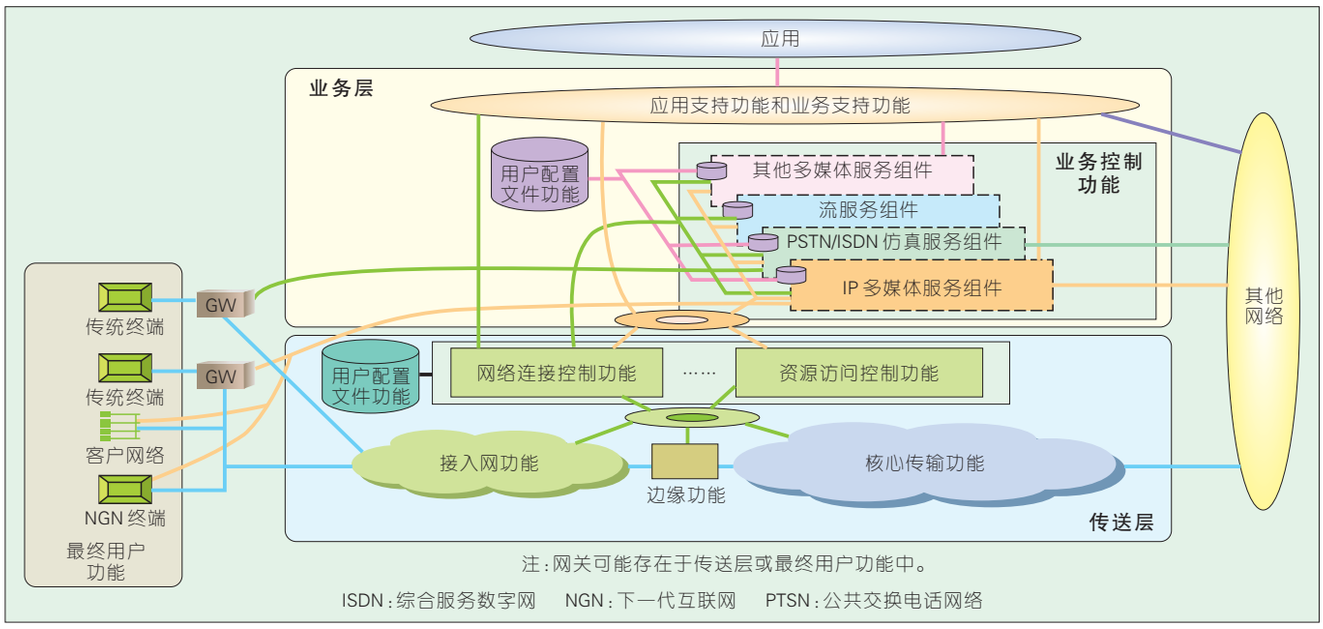
在ITU-T SG13的NGN体系中有网络连接控制功能（NACF）和资源访问控制功能(RACF)两个功能模块，这是业务层和传送层之间的纽带，它的作用如同SDN中提到的北向接口的作用。在互联网的设计中，业务层和传送层彻底分离，两者完全不关联，这导致的后果是：互联网业务均是OTT业务，互联网业务无法承诺最低质量，并且业务的商业模型单一，由此严重影响互联网的发展和互联网中的用户体验。北向接口的提出表明互联网界已经认识到业务层和传送层关联的必要性。

SDN可以分为以下两类。

第1类是基于OpenFlow的SDN。虽然在一些简单的应用中，也有使用OpenFlow协议，但仅用于传送转发表，从本质来说基于OpenFlow的SDN真正用途应该是传送流表并生成新的网络。第1类SDN主要用于生成新的网络，具体步骤是：提出对新型网络的技术需求，提出新型网络的完整体系架构和总体技术要求（即完成网络的顶层设计），设计流表，开发软件，生成新型网络，能力开放，北向接口开放，以及在控制器中增加软件定义能力。其应用场景主要有以下两个方面：

（1）网络技术的创新平台。网络的创新平台是第1类SDN的主要应用场景。创新平台最成功的案例是IP网（TCP/IP），这是一个业务与应用的创新平台，由于它的简单、开放以及其巨大的规模，在其（IP网）上开发业务和应用几乎不需要投入。因此它成功造就了互联网业务和应用的繁花似锦。另一个成功案例是Planetlab，这是一个网络层以上的创新平台，由于使用的人数不多，因此并不广为人知，但它在P2P开发中的成功应用，极大地加速了P2P应用的开发。开发者只要将P2P等的软件加载至Planetlab的节点中去，就可以获得大规模网络中的测试和试运行，从而大大降低开发门槛，促进P2P技术发展。网络技术40多年没有实质性的改变，主要因为网络的开发投入非常高。正因为如此，网络创新需要开放的创新平台。基于OpenFlow的SDN可以用作创新平台，尽管它还没有那样完善，但它具备了网络创新平台很大一部分能力，具有很大的潜力。届时网络创新的门槛将大为降低，一个普通的研究人员就有可以创造出全新的网络。

（2）研究和生成新型网络。目前



▲图4 NGN的体系架构

研究新型网络必须是自行设计、开发并制造特定的硬件和软件的。要构成一个完整的网络，所需网络设备的种类较多，技术研究门槛极高。硬件的标准化、模块化有利于降低网络研究和开发门槛。本场景应用相当广泛，特别是在做小型试验运行网时将特别有效。目前也有厂家特别是一些IT的厂家，试图将网络中的设备的硬件都模块化和标准化，所有的网络工作都由软件来完成。这种思路是否可行，特别是在高速网和大网上，目前还没有答案。

第2类SDN与OpenFlow没有必然的关联关系。尽管在很多场合还是使用了OpenFlow，但不用OpenFlow也完全不影响它的工作。在第2类的SDN中又可以分为软件驱动网络和软件定义组网两类。

软件驱动网络的设想是很合理的，它的基础就是图4的NGN的体系架构，在图4中明确揭示NGN必须要将业务层和传送层关联起来，因此网络的北向接口必不可少。目前互联网产生种种问题的原因就是因为其体系中没有网络的北向接口。从表面上来看，这个问题解决起来似乎很简单。但实际上，当网络规模不大时，只要做加法即可；但随着网络的扩大，就会产生很多问题，目前所想到的办法都存在着严重的扩展性问题，因此是无法真正实现的。由于IP网机理中的基因缺陷，北向接口做起来很难，IP网没有顶层设计，所做的改进都在做加法，但加法对局部是会有一定效能，但从整体而言，效果比较差。

软件定义组网所包含的就更宽了，包括：智能网管+QoS路由+软路由器；网管能力开放，并增加软件定义能力；网管智能化，网络能力虚拟化和智能化等。目前提出的绝大多数的SDN应用场景都属于这一类，对于这类场景，一般来说对局部、小范围均会有效，但整体和规模大了都将无明显效果。所做的工作还是目前在做的工作，实质并无改变，只是加了一个SDN的包装。

第2类SDN适用于：改造现有网络，简化网络操作，提升网络性能，提升网络能力。对已有网络而言，基本上不作本质上的改变，只是增加一些网络智能：如网管智能，网络检测能力的智能，网络资源管理能力的智能等。所有的工作主要是做加法，网络的总体复杂度将会有进一步的提升。

4.3 对SDN的建议

SDN是以“推倒重来”的态势提出的，改变流表就意味着可创造一个新的网络，它可以完全不是IP网，因此的确有颠覆性的创新能力。但再进一步研究我们可以发现，SDN并非是将一切都推翻，进行任意颠覆性的工作，而是在认真总结已有的、全部技术的基础上，有继承、有发展、有创新的变革。OpenFlow的研究者在认真研究和分析后认定：网络的分组化是方向，业务网和承载网相分离的基本理念是正确的。互联网的主要问题是其存在的问题长期未得到解决，因此需要研究出新型分组数据网来。因此，基于OpenFlow的SDN，实际上是对现有技术的继承、发展和创新，它的定位是创造出新的分组数据网，实质性地改造和改变IP网，是网络层革命性创新的工具和手段，要解决的是网络层（与IP网同一层面）的技术问题。它的特点是突出网络虚拟化能力，通过控制器，用软件来改变虚拟面中数据流的转发特性。新

型分组数据网的研究和开发的门槛很高，特别是要拥有规模的网络验证。使用SDN技术可以构建分组数据网的创新平台。但目前的SDN不是目标网络，而是创新平台，目前的所有应用只是中间产品。

中国在网络技术的掌握和控制上虽已处于世界第二位，但却一直处于跟随者的位置；美国在网络技术的掌握和控制上处于世界第一位，是真正的技术创造者和技术核心资源的拥有者。第二与第一相比有着实质上的差距，不在同一个量级。但是经过了20—30年的努力，在网络技术方面尤其是在下一代网技术的研究上，随着中国的产业发展，中国和国际是同步的；在下一代数据网（IP网也是一种数据网）技术上，中国是领先的，技术上已有突破。在网络技术上对新技术采用长期跟踪的策略，是对自主创新技术的漠视以及技术自信心不足的表现。目前中国新技术自主创新的做法和20世纪80年代对国产网络设备态度相仿，即相信国际上技术或概念；而采用中国的技术，往往是得不到认可的。其实跟踪是有代价的，有时其代价比自主技术所需要付出的代价更高。要确认中国的自主技术也要有一个过程。目前，业界特别缺乏一个第三方独立、权威的新技术的评测、评估体系，更缺乏新技术的推进和推广体系。

SDN技术体系结构、协议及使用案例均过于简单，但同时在体系结构、协议及在硬件上都有很大的开拓空间。对于SDN来说，真正的困难源于对网络的理解，需要对网络的顶层设计有着清晰明确的理解，因此，SDN中最大、最难的问题是software的设计和开发。对SDN而言机遇与挑战共存，机遇大于挑战，我们需要做的是明确方向，摆脱跟随思维，走自己的路。

参考文献

[1] 蒋林涛.互联网引入带来的机遇与挑战[J].电信科学,2008,24(1):1-6.
[2] 蒋林涛.未来互联网的承载网络[J].中兴通讯技术,2010,16(2):10-12.

作者简介

蒋林涛，信息产业部电信研究院科技委主任、教授级高工，IP与多媒体标准技术工作委员会主席，ITU-T SG13副主席，国家"863"通信主题多媒体专业专家组一、二、三届成员；长期从事多媒体、数据通信、IP技术的研究开发和标准制订工作；1992年获国务院颁发的政府特殊津贴，1996年获"中华人民共和国有突出贡献的中青年科学技术专家"称号。

综合信息

中兴通讯光网络增长创新高 稳居全球第二

著名咨询公司OVUM刚刚发布了2013年2季度全球光网络市场分析报告，报告指出：2013年第2季度，全球光网络市场收入为40.8亿美元，市场累计4季度收入为149亿美元。值得一提的是：2013年第2季度，中兴通讯继续超越阿朗，稳居全球第二，并且收入创历史新高，滚动4季度市场份额环比增长全球第一。

技术变革创造赶超新契机。光网络市场正处于一个新旧技术交替的关键时间窗。技术的变革，对光通信企业而言，是一场全新的挑战，各企业必须紧追客户的需求去以适应新的市场环境，但是技术变革更是有备而来者全面赶超的契机，中兴通讯就是成功抓住了变革的机遇，凭借PTN、OTN等新一代光网络设备成功赶超前者，晋级全球第二。

产品竞争力是关键生力军。中兴通讯副总裁许明介绍："中兴通讯在承载网产品上一直保持着较高的研发投入，PTN产品自2008年推出以来一直处于业界第一的地位。OTN和100G产品，也是中兴通讯当前投入的重点，在产品技术上同样具备很强的竞争力。"

自10G、40G到100G一路走来，中兴通讯在光网络技术与解决方案的研究与开发方面，一直秉承自主研发核心技术的理念。许明介绍，2008年中兴着手研究100G高速传送技术，2009年成立北美光波研究所，致力于超100G技术的研究。2010年中兴通讯作为中国唯一厂家以100G设备参与了上海电信OTN测试并取得了非常好的成绩。2011年中兴通讯正式发布了100G相干光网络设备，支持软判决FEC，兼顾高速、高带宽及大容量OTN交叉调度等客户的不同需求。该产品凭借独特的创新优势和客户的广泛认可，在2013年摩纳哥WDM论坛上，成功摘取最佳100G光网络设备大奖。

在100G方面，2012年2月，中兴通讯就与德国电信合作，在德国本土成功地完成了100G/400G/1T信号的2 450 km超长距离混合传输，创造了迄今为止业内高速信号混传最长距离的现场试验纪录。

视野决定未来格局。"信息产业正处在一个最佳的发展时期，随着各种新技术的涌现，未来通信行业和互联网等行业的界限日益模糊，运营商和企业客户都面临全新的挑战，作为设备商，中兴通讯只有以更宽阔的视野，更透彻把握客户需求和技术的发展趋势，更合理的产品规划，才能持续保持竞争力。"许明表示。

中兴通讯已在超100 G技术和产品的研发中创造多项世界纪录。（转载自C114中国通信网）

DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2013.04.010
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130626.1629.001.html

基于翻译的IPv6过渡关键技术及部署

Key Technologies for Translation-Based IPv6 Transition

蔡广平/CAI Guangping
钟 炜/ZHONG Wei
(中兴通讯股份有限公司,广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

摘要:阐述了几种重要的基于翻译的过渡技术,分析了其工作原理、技术特点、主要应用场景以及各技术的优缺点,同时探讨了实际部署基于翻译的IPv6过渡技术应考虑的相关问题。基于翻译的IPv6过渡技术可以延长IPv4使用期限,实现IPv6和IPv4互联互通,能够最大限度地保护投资者利益,确保网络平滑演进与过渡。选择何种过渡方案涉及很多因素,需根据网络特点等具体情况,选择适合的过渡技术。

关键词:IPv6过渡;翻译技术;应用场景

Abstract: In this paper, we describe several important IPv6 transition technologies based on translation. We describe the working principle, technical characteristics, and advantages and limitations of each technique. We also discuss typical scenarios in which these techniques might be used. IPv6 transition technologies based on translation extend the lifetime of the IPv4 network and allow communication between IPv4 and IPv6. They protect network to the greatest possible extent, and ensure the smooth transition from IPv4 to IPv6. When choosing IPv6 transition technologies, many factors need to be taken into account. Transition technologies must be selected according to the network's individual characteristics.

Key words: IPv6 transition; translation technology; application scenarios

中图分类号:TP393.03 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2013) 05-0047-05

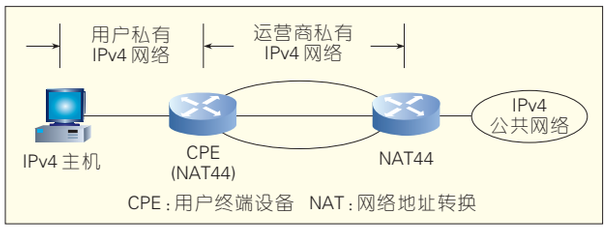
由于IPv4地址耗尽,2011年以来中国IPv4地址数量几乎没有新增,而三网融合、云计算和移动互联网又需要大量的IP地址。通过发展IPv6来解决这一问题,业界早已达成共识,但是IPv6地址和IPv4地址并不兼容,运营商网络、业务平台、终端以及内容提供商网络都无法在短期内全面支持IPv6,并且运营商网络基础不同,不同区域面临的问题不尽相同,因此如何经济、高效、平滑地过渡到IPv6是目前所面临的难题。IPv6过渡技术方案众多,但归结起来主要有三大类:双栈、隧道、翻译。在向IPv6网络演进初期,内容提供商和应用服务仍然以IPv4为主,如果新增用户只采用IPv6地址,基于双栈和隧道的过渡技术则不能解决IPv6用户访问IPv4因特网的问题;若为新增用户分配双栈地址,又无法解决IPv4地址耗尽的问题;此外,由于全网均为双栈仅为理论方案,因此在整个网络向IPv6演进过程中,通过隧道或双栈技术均无法实现IPv4和IPv6网络的互访互通,而基于翻译的过渡技术可以解决此类关键问题。文章结合IPv6过渡技术开发与测试实际,探讨基于翻译的IPv6过渡关键技术,并分析各自特点,给出了典型部署,以及实际部署中应考虑的相关问题。

收稿日期:2013-06-06
网络出版时间:2013-06-26

1 NAT444

NAT44是IPv4-IPv4的网络地址转换(NAT)技术,早在1994年已被提出(RFC1931)。当时NAT提出的背景是:在某一段时间内,一个局域网内只有少部分主机需要访问外部网络,大部分主机只需要访问域内网络,甚至有些主机从不访问外部网络。因此,在该局域网内可使用互联网数字分配机构(IANA)预留的局部地址(RFC1918),此类地址在不同的局域网内可以重复使用。当域内某些主机需要访问外部网络时,通过NAT将局部地址转换为全球唯一的全局地址,局域网只需要少量的全局地址。这些全局地址在不同的时刻可由域内不同的主机占用,极大地减少了对全局地址的占用,达到节省IPv4地址的目的。NAT44应用已非常普遍,是各类小型家用路由器的基本功能之一。

NAT444是指部署在运营商网络内的NAT44设备,网络模型如图1所示。因特网服务提供商(ISP)网络和用户网络均为IPv4网络,服务提供商将IANA预留的局部地址分为两类:用户级局部地址和运营级局部地址。在用户终端设备(CPE)和运营级设备各作一次NAT44,在用户级将用户级局部地址翻译为运营级局部地址,在运营级再将运营级局部地址翻译为全局公有地址。由于作了两次NAT,因此把运营级NAT44称之为



▲图1 NAT444网络模型示意图

NAT444，也称为电信级NAT(CGN)或大规模NAT(LSN)。NAT444设备具有大容量、高性能的特点，可满足高速数据吞吐需求；其机间或板间采用1:1或1:*N*安全备份，满足电信级设备高可靠性要求；地址规划与分配方式灵活多样，用户地址与端口号可预分配，与网管系统、AAA服务器、日志管理等配套可解决因引入NAT对用户溯源、用户行为分析等运维管理造成的影响。

NAT444主要优点为：

- NAT444实现了运营级IPv4地址复用与共享，可有效解决IPv4地址枯竭问题。
- 用户网络和运营商接入网络都可以保持现有IPv4网络不变，只需在汇聚层或核心层增加NAT444设备即可，无需进行大规模设备替换，投资成本低、投资风险低。
- 用户和运营商网络都为IPv4单栈，NAT444技术方案成熟，运维成本低。
- 部署方式灵活，还可方便地和其他IPv6过渡技术配合使用，如IPv6快速部署(6RD)或双栈。

因此NAT444不但适用于IPv6过渡初期，也可作为中长期演进方案。图2给出了NAT444和6RD配合使用模型。图3为NAT44和双栈配合使用模型。

NAT444主要不足为：

- 并未正真引入IPv6网络，在过渡后期还需要进行设备更替。
- NAT破坏了IP网络端对端通信的特点，对一些应用协议处理比较复杂。
- 需对网管系统、行为分析系统等运维系统进行升级。

2 DS-LITE

双栈指的是IPv4和IPv6协议栈，如果网络节点支持双栈，则该节点既可以处理IPv4分组，又可以处理IPv6分组。双栈是理论上较完美的IPv6过渡方案，但实际中一方面全网双栈是不现实的；另一方面对于新建网络，若采用双栈需同时占用IPv4和IPv6地址，并不能解决IPv4地址短缺的问题，若采用IPv6单栈，演进早期IPv6用户无法访问内容丰富的IPv4内容提供商网络。轻量级双栈(DS-LITE)，旨在解决IPv4主机穿越运营商的纯IPv6网络(如接入网、汇聚网)访问IPv4内容提供商网络，以及通过IPv4-IPv4 NAT实现运营级IPv4地址复用，以解决IPv4地址匮乏问题[1]。

DS-LITE网络模型如图4所示，其中ISP网络为纯IPv6网络，用户网络中可能只有IPv4主机，也可能存在IPv6主机或双栈主机(当双栈主机用IPv6地址访问网络时可视为IPv6主机；反之可视为IPv4主机)，为IPv4主机分配局部地址，对于IPv6主机地址分配和访问IPv6网络按照IPv6协议进行转发与处理。B4(基于桥接的宽带网关)和地址族过渡路由器(AFTR)是DS-LITE的两个主要模块，都支持双栈。

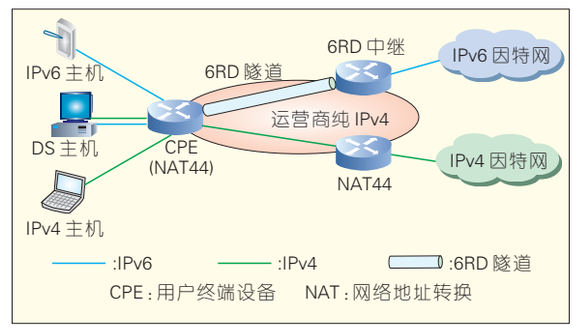
B4是DS-LITE用户接入模块，存在于CPE或者直接驻留在终端设备中(如在无线应用场景中，无线终端不经CPE而直接接入ISP网络)，主要完成如下几方面的功能：

- 隧道建立，隧道封装/解封装

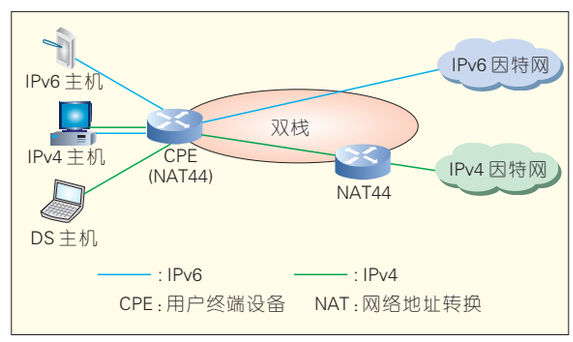
B4设备与AFTR之间建立多点对点的IPv4-in-IPv6(4in6)隧道，通过手动配置或DHCPv6等方式，B4可以获取AFTR地址。对于来自IPv4主机的IPv4报文，B4完成隧道封装；对于来自AFTR的4in6报文，B4完成隧道解封装。

- 分片和重组

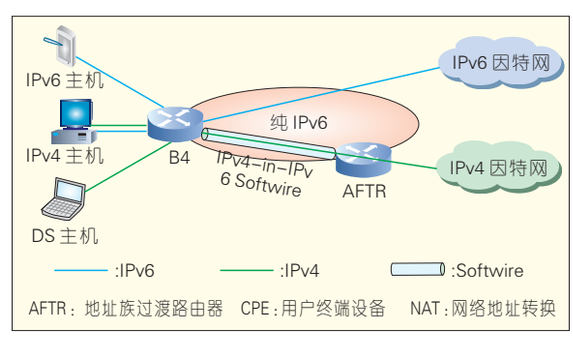
封装4in6隧道后报文长度可能会超过最大传输单元(MTU)，通过路径MTU发现协议(RFC1191)并不能可靠地解决这一问题。一种解决方法



▲图2 NAT444与6RD配合使用的模型



▲图3 NAT444与双栈配合使用的模型



▲图4 DS-LITE网络模型

是增大B4与AFTR间链路的MTU值，另一种方法是采用分片与重组。B4需支持分片与重组，对于来自用户的报文，封装隧道后进行分片；对来自AFTR的4in6分片报文，在隧道解封装前进行重组。

• DNS代理

运营商为B4仅分配IPv6地址，B4通过DHCPv6只能获取到域名系统(DNS)服务器的IPv6地址，而不能获取到IPv4地址，因此B4需要支持DNS代理，实现基于IPv4的DNS相关服务。

AFTR是ISP网络中4in6隧道的汇聚点，主要可以完成如下几方面的功能：

• 隧道建立，隧道封装/解封装

AFTR与B4建立点对多点的IPv4-in-IPv6隧道，AFTR完成来自B4隧道报文的解封装以及发往B4的IPv4报文的隧道封装。

• 分片和重组

与B4类似，AFTR需对来自B4的4in6分片报文先重组再解封装；对发往B4的报文，封装隧道后若超过MTU，需要进行分片。

• NAT44转换

这是AFTR的主要功能，将IPv4局部地址转换为IPv4全局地址，其转换原理、转换方式等与NAT44相同。但与NAT44不同的是：B4的IPv6地址(Softwire ID)也是NAT映射关系生成的主要因素之一，不同的B4下可以使用完全相同的IPv4局部地址。因此当两个相同的IPv4局部地址所属的Softwire ID不同时，所生成的NAT会话不同[2]。

DS-LITE作为向IPv6演进的主要方案之一，主要优点为：

• 剥离了ISP网络、用户网络、因特网之间的耦合，ISP网络发展IPv6网络不受用户网络和因特网的影响，可独立地直接演进到纯IPv6网络。

• 为IPv4主机分配局部地址，不同B4下IPv4地址可完全相同，能够有效解决IPv4地址短缺问题。

• 用户可以自主地决定是否采用IPv6网络，并且当用户过渡到IPv6时，对ISP网络无额外要求。

• 对于IPv6用户直接按照IPv6协议处理，并且可以获得更好的用户体验。

• 4in6隧道可以在任意节点终结，AFTR部署灵活。

DS-LITE主要不足为：

• CPE等用户接入设备需要更新升级，增加成本。

• 因在AFTR需要做NAT44转换，因此DS-LITE会继承NAT44的一些不足。

• 不能解决IPv6主机访问IPv4网络的问题。

3 NAT64

由于向IPv6网络演进初期因特网仍然以IPv4为主，因此存在IPv6用户无法访问内容丰富的IPv4因特网问题。早在2000年因特网工程任务组(IETF)就提出IPv6-IPv4协议转换的附带协议转换器的网络地址转换器(NAT-PT)技术(RFC2766)，以解决这一问题。然而由于NAT-PT在实际应用中存在如与DNS耦合太紧等诸多缺陷，IETF于2007年废弃了NAT-PT(RFC4966)，不再推荐使用，为此IEFT又推出了NAT64[2]。

NAT64是一种IPv6-IPv4间的AFT，是一种有状态的网络地址和协议转换技术，因此NAT64又称为Stateful NAT64或Stateful AFT[3]。

NAT64模型如图5所示，IPv6客户端和IPv4服务器分别位于纯IPv6、纯IPv4网络中。NAT64至少有一个接口与IPv6网络相接，一个接口与IPv4网络相接，且支持双栈。DNS64是将域名解析的A(32 bits IPv4地址)查询记录翻译成AAAA(128 bits IPv6地址)查询记录，供IPv6客户端使用，其中由A到AAAA的地址翻译格式由RFC6205规定。

NAT64和DNS64配合，可实现IPv6客户端访问IPv4服务器，具体流程为：

(1)IPv6客户端向DNS64发起某WWW地址(不妨称为X)的AAAA域名查询请求。

(2)DNS64查询本地域名系统，若X对应的AAAA存在，则向IPv6客户端返回AAAA；若本地域名系统不存在，DNS64发起X的A域名查询请求，获得A域名后将A记录转换为AAAA记录，然后将AAAA记录返回给IPv6主机。

(3)IPv6客户端获得IPv4服务器对应的AAAA后，向IPv4服务器发起建链请求，该建链报文的SIPv6为IPv6客户端的IPv6地址，DIPv6为AAAA记录对应的IPv6地址，在IPv6网络内该报文必须路由到NAT64。

(4)NAT64对建链报文进行IPv6-IPv4转转，其中DIPv4是从IPv6报文的DIPv6中通过约定格式解析获取(RFC6205)，SIPv4是按既定的NAT64规则从NAT64 IP池中获取一个IPv4公网地址，此外也可对源端口号等作相应的转换。

(5)IPv4服务器响应IPv6客户端的请求。

(6)NAT64对来自IPv4服务器的报文通过查询IPv6-IPv4转换状态(NAT64会话)进行IPv4-IPv6转换，将IPv4报文转换为IPv6报文；若NAT64

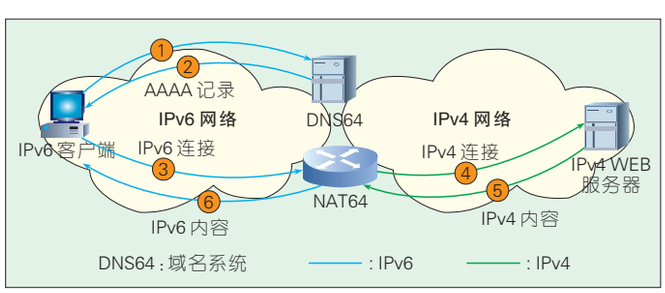


图5▶
NAT64网络模型

未查询IPv6-IPv4转换状态，则丢弃报文。

由上述过程可见，对于IPv6客户端和IPv4服务器感知不到NAT64是否存在以及报文是否作了NAT64，对于IPv6客户端访问IPv4服务器的方式与访问位于纯IPv6网络的IPv6服务器的方式完全一样，因此NAT64对客户端和服务器端都不可见。

一般情况下，在NAT64的应用场景中需IPv6主机首先向IPv4主机发起通信，如图6所示。但通过设定NAT64静态映射规则等方式，也可实现IPv4主机首先向IPv6主机发起通信[4-5]。

NAT64主要优点为：

- IPv6用户可以访问内容丰富的IPv4因特网，实现IPv6和IPv4网络的互通互访。
- 可以为新增用户直接分配IPv6地址，无需占用已枯竭的IPv4地址，网络业务发展不受限于IPv4地址的枯竭。
- IPv6用户可直接访问纯IPv6的网络服务和应用。
- 运营商网络可以只支持IPv6单栈，无需支持IPv4。
- 通常只能由IPv6主机发起通信，安全性高。

NAT64主要不足为：

- 运营商需要升级DNS，以支持A记录与AAAA记录间的翻译。
- NAT64同NAT44一样为有状态翻译，因此同样会存在因翻译带来的不足。

4 IVI

IVI是另一种基于翻译的过渡技术，罗马数字用IV表示4，用VI表示6，因此用IVI表示IPv6-IPv4翻译，或IPv4/IPv6融合与互联互通。IVI同NAT64一样，是IPv6和IPv4协议族间的转换，但由于IVI通过事先设定的算法来实现IPv6-IPv4转换，无需在转换设备上维护IPv6-IPv4的映射关系，是种无状态的翻译技术，因此IVI也称为无状态地址族转换(Stateless AFT)或被称为无状态NAT64(Stateless NAT64)[6]。

IVI的基本思想是：将IPv6主机地址在IPv4网络中映射的IPv4地址内嵌在IPv6主机的IPv6地址中，IVI通过对IPv6主机的IPv6地址解析，就可以直接获取到与之对应的IPv4地址，即IPv6主机地址必须是可以翻译出IPv4地址的IPv6地址，因此运营商需为IPv6主机分配特殊的IPv6地址，可通过手动配置或DHCPv6动态分配。IPv4主机在IPv6网络中映射的IPv6地址必须包含IPv4主机地址，即必须是由IPv4主机地址转换得到的IPv6地址，通常由IVI DNS完成IPv4主机地址到IPv6地址的转换，IVI DNS工作原理与DNS64相同，完成A记录和AAAA记录的相互转换。IPv6主机地址格式、IPv4主机映射成的IPv6地址格式均由RFC6205规定，这两类地址的前缀必须使用运营商的路由前缀。

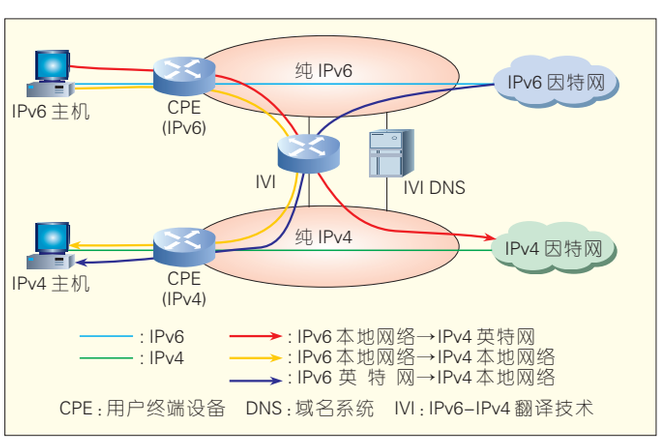
IVI主要应用场景如图7所示，它支持IPv6本地网络(IPv6 Network)访问IPv4因特网(IPv4 Internet)、IPv4因特网访问IPv6本地网络、IPv6本地网络访问IPv4本地网络、IPv4本地网络访问IPv6本地网络。但对于IPv4本地网络与IPv6本地网络的互访，通常需二者为同一运营商所管理。IVI支持IPv6主机发起的通信，也支持从IPv4主机发起的通信。

IVI的主要优点为：

- 运营商可直接部署纯IPv6网络，有利于IPv6发展。
- 可实现IPv6网络与IPv4网络的互通互访问。
- IVI为无状态翻译，IPv6和IPv4主机都可以首先发起通信。
- 通常只需翻译IP层，无需修改传输层，实现简单效率高，例如安全备份无需相互同步状态等。
- 部署性价比高于NAT64。

IVI主要不足为：

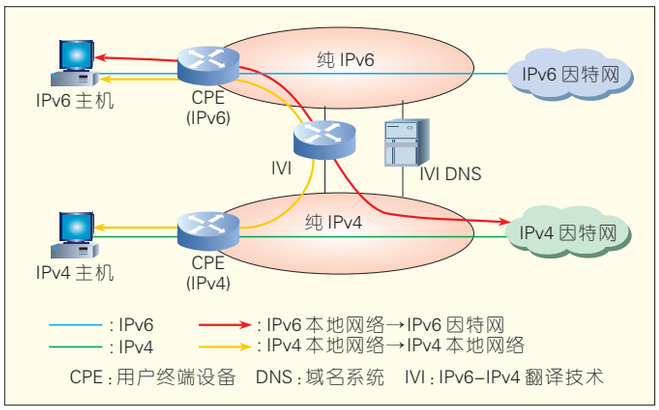
- IPv6主机地址与IPv4地址的映射为1:1(在其他文献中有IVI通过端口复用等方式实现1:*N*，但实现比较复杂并未出现在RFC6219)，IVI并不能解决IPv4地址枯竭问题。
- 运营商需要升级DNS，以支持A记录与AAAA记录的翻译。
- 尽管为IVI为无状态，但仍需ALG支持某些应用协议。
- 安全性不及NAT64。



◀图6 NAT64主要应用场景示意图

5 基于翻译的过渡技术部署

CGN(在此将NAT444、DS-LITE、NAT64、IVI等基于翻译的过渡技术都称为CGN)设备形态按照与既有设备的关系可分为独立式和插卡式两类，独立式是指CGN设备与现有设备(如宽带远程接入服务器(BRAS)或核心路由器(CR)等相互独立，以旁挂于现有设备的方式部署；插卡式指现有设备提供空闲插槽，CGN设备以板卡形式与现有设备融合部署。按照部署层面不同，CGN部署分为集中式部



◀图7 IVI主要应用场景示意图

署和分布式部署，集中式指CGN设备部署在网络流量出口，如城域网核心层或移动分组域承载CE层；分布式指CGN设备部署在业务控制层，如BRAS。表1列出CGN设备的4种典型部署。

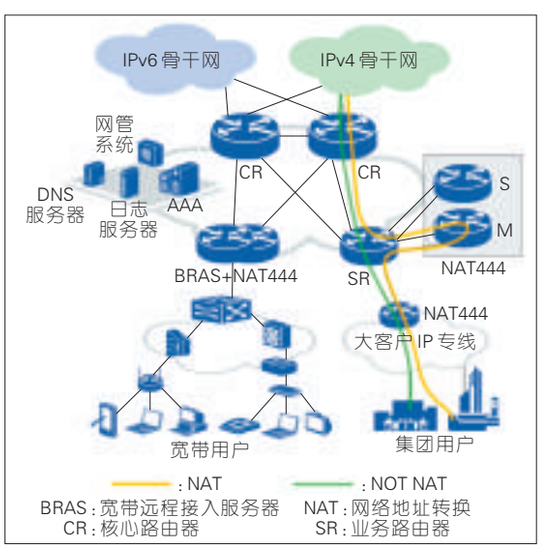
下面以NAT444部署为例，说明CGN部署对现网的影响，网络拓扑如图8所示。NAT444部署在城域网业务控制层，其中宽带用户接入BRAS节点采用插卡分布式部署，大客户业务路由器(SR)节点采用独立分布式部署，提供大流量的NAT转换，并与AAA服务器、日志服务器等配套系统一起解决用户溯源、单点认证、行为分析等问题，实现运营级NAT服务。

▼表1 CGN典型部署

	分布式	集中式
独立式	独立分布式部署	独立集中式部署
插卡式	插卡分布式部署	插卡集中式部署

对于SR旁挂NAT444独立部署，用户上行流经SR通过策略路由把需要NAT的流导入NAT444独立设备，并作NAT后再次返回SR经CR接入骨干网；然后再返回下行流通过路由引导到NAT444。此外，该场景中插卡式和独立式部署都采用1:1安全备份，独立设备采用机间备份、插卡式采用板间备份，当主设备M出现故障，自动切换到备设备S。

AAA服务器从网管系统接收用户地址映射关系信息，存储在本地并维护各NAT444的用户映射关系。网管系统对NAT444统一管理，如统一生成用户地址映射关系表以及地址池，端口块大小等参数信息，通过简单网络管理协议(SNMP)等协议下发配置信息到NAT444设备或AAA服务器。NAT444生成NAT日志，如每生成或老化一条NAT映射规则时则会产生一条日志信息，并及时上传给日志服务器。日志服务器管理NAT日志信息，对日志信息分析统计，提供管理接口，响应用户查询日志信息。可见引入NAT需要对现网AAA服务器、网管系统等配套设备进行升级。此外，实际部署还需考虑安全管理、故障管理、性能需求以及机箱、线缆、环境等要素。



▲图8 NAT444部署场景

6 结束语

由于IPv4地址资源枯竭，过渡到IPv6是网络发展的必然趋势。但是运营商网络、业务平台、终端以及内容提供商网络都无法短期内全面支持IPv6，因此向IPv6过渡是长期的过程。基于翻译的IPv6过渡技术可以延长IPv4使用期限、实现IPv6和IPv4互联互通，最大限度地保护投资者利益，确保网络平滑演进与过渡。此外，选择何种过渡方案涉及很多因素，需根据网络特点等具体情况，选择适合的过渡技术。

参考文献
[1] DURAND A, DROMS R, WOODYATT J. Dual-stack lite broadband deployments following IPv4 exhaustion[S] .IETF RFC 6333 .2011.
[2] 刘腾飞,秦雅娟,王利利. 代理移动IPv6下子网移动方案的实现与分析[J].重庆邮电学院学报(自然科学版), 2013 (3):372-378.
[3] BAGNULO M, MATTHEWS P,VAN BEIJNUM I. Stateful NAT64: Network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers[S]. IETF RFC 6146.2011.
[4] 吴大鹏. IPv6的发展与现状[J]. 数字通信,2010 (2):16-19.
[5] 陈建军, 邱伟, 黄孟俊, 赵宏钟, 付强. 基于距离单元筛选的扩展目标检测新方法[J].雷达科学与技术, 2012(3):294-300.
[6] LI X, BAO C,BAKER F. IP/ICMP translation algorithm[S]. IETF RFC 6145.2011.

作者简介

蔡广平，中南大学硕士学位毕业；中兴通讯网络开发四部工程师；主要从事网络处理器软件以及IPv6过渡技术开发工作。

钟炜，南京理工大学硕士学位毕业；中兴通讯网络开发四部工程师；从事过多款高端路由器设计与开发工作，专注于分组转发技术研究。

DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2013.04.011
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130626.1657.002.html

合同能源管理的方案和盈利模式研究

Energy Performance Contracting: Solutions and Profit Models

许璐/XU Lu, 李兆伟/LI Zhaowei, 刘丽伟/LIU Liwei
(中兴通讯股份有限公司,广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

中图分类号:TP393.03 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2013) 05-0052-04

摘要:合同的能源管理的商务模式,能够通过分析基站设备能耗分布情况,运用先进高效的节能设备和节能方案,为客户节省能量和运营投资,最终达到站点节能降耗的效果。节能公司与客户分享项目实施后产生的节能效益来收回项目投资、获得利润,形成滚动发展。这种新的商务模式,为客户减少项目投资及技术风险,并且可以更快地降低能源成本和运行成本,提升了客户竞争力。

关键词:合同能源管理;节能减排;盈利模式;节能改造

Abstract: Contracting out network energy management is a new trend that saves energy and money for the operator. It has also given rise to a new commercial contract model. Clients can optimize their investment by using advanced, highly efficient energy-monitoring equipment to determine the power consumption of base stations. This also helps improve overall energy efficiency at the site. Energy-saving companies aim to help operators recoup their investment, obtain profits, and re-invest the savings in rolling development. This new commercial model reduces project investment and technology risk, and faster lower power cost and operating cost, and improves users' competitiveness.

Key words: energy performance contracting; energy conservation; profitability model; energy-saving reconstruction

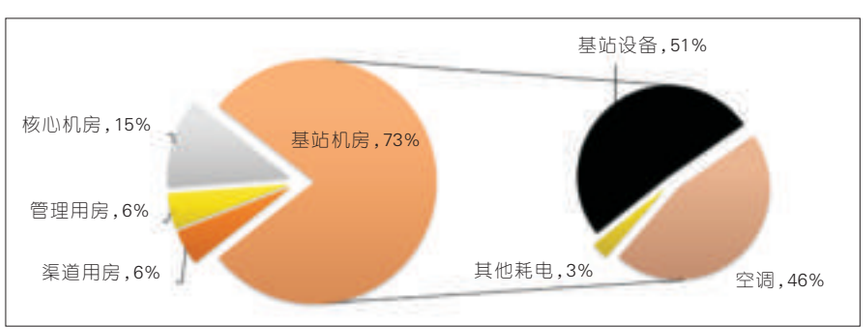
目前,中国的"十二五"规划明确提出需要加快合同能源管理,并陆续出台相关优惠政策和补贴政策。三大运营商正积极开展节能减排工作:中国电信公布2012年"单位信息流量综合能耗"比2009年下降30%以上,中国移动在2012年12月底实现了单位业务量耗电下降20%的目标,中国联通也提出能源消费零增长的目标。

如图1所示,基站设备和空调是节能降耗的重点对象。我们需要为企业客户在各个环节实施节能改造,并提供诊断、设计、融资、改造、运行、管理的"一条龙服务",同时向客户提供能源审计、可行性研究、项目设计、项目融资、设备和材料采购、工程施工指导、人员培训、节能量检测、改造系统的运行、维护和管理等服务,并通过与客户分享项目实施后产生的节能效益来收回项目投资、获得利润,形成滚动发展。

节能服务公司(在一些国家简称ESCO公司,在中国简称EMC公司)的经营机制是一种节能投资服务管理。客户见到节能效益后,公司才与客户一起共同分享节能成果。ESCO公司的发展十分迅速,尤其是在美国、加拿大和欧洲,已发展成为一种新兴的节能产业。相关部门同世界银行、全球环境基金共同开发和实施了"世行/全球环境基金中国节能促进项目",并在北京、辽宁、山东成立了示范性能源管理公司。

1 合同能源管理模式的特点和应用

在传统的节能投资方式中,节能项目的所有风险是由节能投资的企业承担;而在合同能源管理方式中,其资金由专业的节能服务公司投入。合同能源管理的实质就是把"节能"当作投资,项目实施后节省的能源费用成为投资回报,投资方根据双方签署的协议从节能效益中收回投



▲图1 移动通信能耗分布图

收稿日期:2013-06-10
网络出版时间:2013-06-26

资并分享部分利润，合同期满后，节能设备及长期收益全部归企业所有。合同能源管理不是推销产品或技术，而是推销一种减少能源成本的管理模式[1-3]。

为进一步加强能源管理和运营商的节能减排工作，中兴通讯能源配套部首次引进“合同能源管理”模式，根据不同的设备及场景，为企业提供了最佳的解决方案。

1.1 主设备节能

当基站的话务量下降时，软件自动控制基站，并根据话务量变化动态关闭或开启部分没有负载的收发信号单元，从而达到节电目的。主要可以有两种方式来解决话务量下降的问题。

- 载频关断。通过话务符合情况及对话务情况进行的相关预测，关闭多余的空闲载频以节约能源，或者打开已关闭的载频使该载频可以随时待命。
- 时隙关断。当载频中业务时隙空闲，系统会自动关闭这些空闲业务时隙所占的功放，如果需要占用时隙则再打开，以达到节省功放功耗的效果。

1.2 开关电源节能

1.2.1 整流模块休眠技术

电源系统能根据当前状态下负载电流和电池电流，计算出系统最高效率工作时的整流模块开机数量，关闭其他整流模块，使工作的整流模块处于效率最高点，降低损耗，从而实现节能[4]。

1.2.2 呼吸式能量管理

工作与休眠的整流模块定期切换，可以避免少数整流模块处于长期工作状态而另一部分整流模块处于长期休眠状态的情况。

利用“先开先关”机制可以保证每个模块的工作时间；使用“先开后关”方式可以保证不间断供电。从整流模块的寿命出发，采取呼吸式功率能量管理方式让多余的整流模块轮流处于关机状态，即每隔一定时间开启一个整流模块然后关闭另一个整流模块，我们称这段时间间隔为呼吸周期。呼吸式能源管理的轮换方式如图2所示。

1.3 蓄电池地埋技术

蓄电池地埋技术是主要通过对蓄电池进行地埋处理，并利用土壤与空气的温度差异为其提供一个适宜的工作环境，从而使得蓄电池的使用寿命以及使用效率能够得到最大的利用[5]。

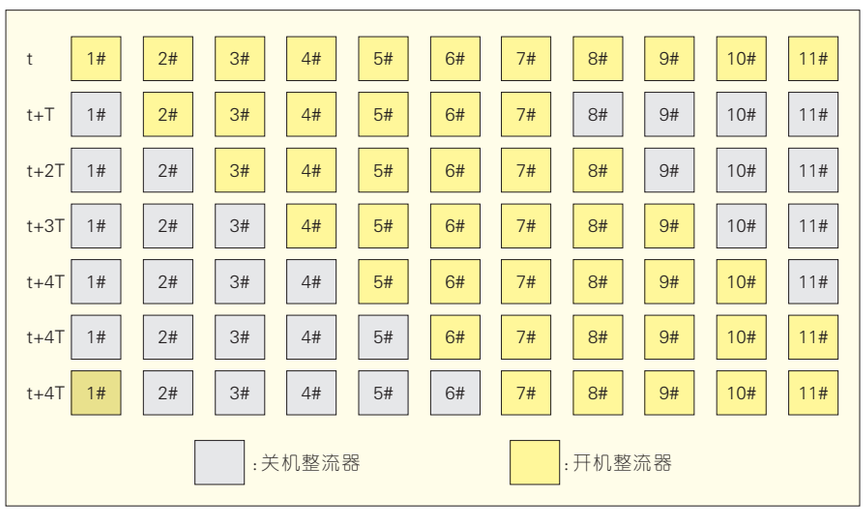
蓄电池地埋技术可以节省地面空间，有效防止偷盗，具体的蓄电池地埋技术方案如图3所示。

1.4 机房升温改造技术

将机房空调启动温度调高到35℃，把蓄电池放入恒温柜内，温度保持在25℃以下，利用智能通风系统，根据室内外温差，将机房外冷空气吸入机房，排风机可将室内设备产生的累计热量排出机房，从而达到降温效果，并且可以减少空调的能耗。该技术的节能效果为：机房空调启动温度提升到35℃，可使空调能耗降低40%~60%。蓄电池恒温柜测试效果数据如表1所示。

1.5 新能源——纯太阳能方案

纯太阳能供电方案是利用光伏组件将太阳能转换成电能，然后通过



▲图2 呼吸式能量管理

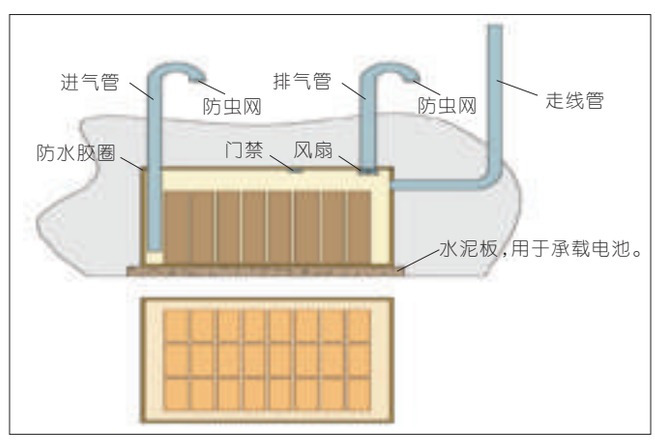


图3▶ 排气式地埋电池柜整体结构图

▼表1 蓄电池恒温柜测试效果数据

设备及参数	数据1	数据2	数据3	数据4	数据5	数据6
空调设定温度/℃	25	27	29	31	33	35
设备耗电/kWh	65	66	69	67	68	70
空调耗电/kWh	48	40	37	33	20	17
TEC功耗/kWh				3	4	5
空调耗电占比/%	42.5	37.7	34.9	32.0	21.7	18.5
日电费/元	101.7	95.4	95.4	92.7	82.8	82.8
年电费/元	37 121	34 821	34 821	33 836	30 222	30 222

控制器对蓄电池充电，并直接给直流负载供电，如果有交流负载，还可以通过逆变器对交流负载供电。如遇到光照不足或者连续阴雨天，则由后备蓄电池放电为负载供电。由于纯太阳能供电方案中没有后备电源，为保障供电可靠性，蓄电池容量和太阳能组件容量要适当地进行配置，若配置容量不足则可能会影响供电的可靠性。

1.6 空调的精细化管理

在站点运行过程中，旧空调在使用一段时间后会出现换热效果下降、用电量增加的问题。其原因是由于压缩机内部润滑油耐磨性不足，在换热器管路内壁形成不同厚度的油膜，降低了换热器的导热效率，导致出风口温度下降，用电量增加。可以采用向空调内添加节能添加剂(PROA)的方式，使压缩机形成一种永久的保护膜，以减少压缩机的用电时间，降低空调磨损，延长使用寿命，该技术节电率可以达到10%~20%。

同时，需要根据季节气候变化特点，加强对空调的使用和维护工作，如定时清理出风口，根据机房温度要求，在基站正常工作情况下适当调高空调制冷温度，以便于减少空调压缩机的工作时间。

2 合同能源管理项目的合作机制及盈利估算分析

节能服务公司为客户实施节能项目，独立承担了与项目实施有关的大部分风险，这样使得客户实施节能项目的风险减少。同时节能服务公司对系统管理、资金筹备等多方面的综合优势，可以有效地减少项目成本，促进自身的发展壮大。以如下的模型为例，分析节能公司的相关盈利模式：

模型为基站1 000个，40A以下基站900个，40A以上基站100个，华东地区典型气候，砖混结构机房，5年框架合同，每年节省电费4:6分成。公司盈利预估分析见表2。

节能企业享受节能项目免税，及企业所得税三免三减半的优惠。这给企业带来了便利。

以某节能公司为例，其合同能源管理年收入2 000万元，5年累计收入为1亿元，其中一次性的投入成本为5 000万元(80%为固定资产投入)。因取得节能企业资质享受相关税务优惠，则5年累计优惠税额为：营业税及附加优惠金额560万元、企业所得税优惠金额616万元。税务优惠相当于增加毛利，两项合计提高毛利率：1 176万/1亿=11%。税收优惠参见表3。

▼表2 盈利预估分析

场景	设备类型	初期投入/元	每年投入/元	节能前耗电/度每日	节能后耗电/度每日	每年节约电费/元	60%节能公司年分成/元	节能公司合同毛利率
基站40A以下场景	空调			20	8	3 942		
	新风系统		800	0	0.3	−99		
综合预估		3 250	800	20	8.3	3 843	2 306	37%
基站40A以上场景	空调			27	5	7 227		
	新风系统		800	0	2	−657		
	电池恒温柜		800	0	2	−657		
综合预估		4 250	1 600	27	9	5 913	3 548	31%
全场景5年1 000站		3 350 000	4 400 000	37 777 500	15 275 250	20 252 025	12 151 215	36%

3 投产应用效果

3.1 主设备节能

通过以上方案，我们在以下站点进行了投产，站点开通后的能耗对比参见图4。

如图4所示，东方红站点开通载频关断功能前平均日功耗为63.7 kWh，而开通功能后日功耗为50.6 kWh，功耗下降20.5%。石牌坊站点开通时隙关断功能前平均日功耗为53.2 kWh，而开通功能后日功耗为46.1 kWh，功耗下降13.3%。

3.2 开关电源节能改造

通过单独升级节能改造管理软件，可提高模块带载率整流器优化服务，并可在软件升级节能效果基础上提升2.6%~4.2%。整体平均节电比例为8.43%。开关电源节能改造效果对比如图5所示。

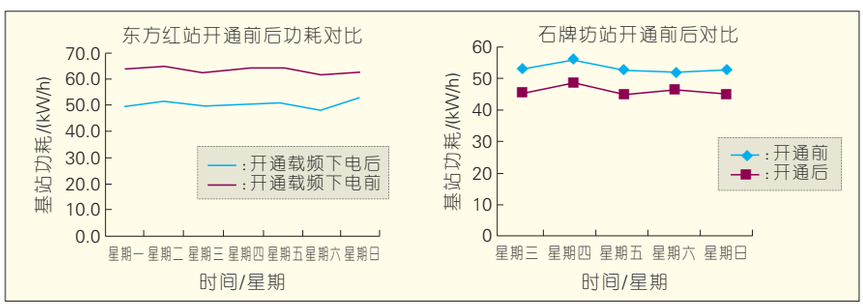
4 合同能源管理模式推广应用中的建议

合同能源管理是一种新的投资收益模式，在项目合作和合同谈判中，必须注意节能效益分成的财务处理方式。并且必须充分考虑在合同期内，如果由于某种原因造成合同无法正常履行时，对节能服务公司的投入如何处置。

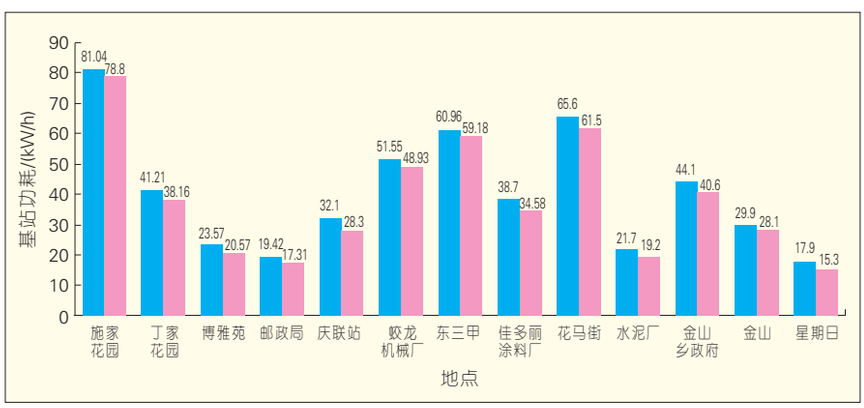
合同中应该明确设备故障或不

▼表3 税务比较

可享受节能服务有关税收优惠						
	第1年	第2年	第3年	第4年	第5年	合计
合同营业额/元	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	10 000
资产性投资/元	4 000					4 000
折旧/摊销年限/年	10	10	10	10	10	
非资产性费用/元	200	200	200	200	200	1 000
营业税税率	0%	0%	0%	0%	0%	0%
营业税及附加/元						
节能项目收入/元	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	10 000
税前可扣除支出/元	600	600	600	600	600	3 000
税率	0%	0%	0%	12.5%	12.5%	
企业所得税/元				175	175	350
不享受节能服务有关税收优惠						
	第1年	第2年	第3年	第4年	第5年	合计
合同营业额/元	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	10 000
资产性投资/元	4 000					4 000
折旧/摊销年限/年	10	10	10	10	10	
非资产性费用/元	200	200	200	200	200	1 000
营业税税率	5%	5%	5%	5%	5%	
营业税及附加/元	112	112	112	112	112	560
节能项目收入/元	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	10 000
税前可扣除支出/元	712	712	712	712	712	3 560
税率	15%	15%	15%	15%	15%	
企业所得税/元	193.2	193.2	193.2	193.2	193.2	966



▲图4 站点开通后的能耗对比



▲图5 开关电源节能改造效果对比

能正常运行且对节能效果有影响时，双方节能分享比例如何确定。同时，要注意节能量的计量方式，这是双方分享节能收益的关键。如变频器的节能测试，应该在生产工艺相同的情况下，进行连续的工频、变频运行测试，准确测试出单位小时节电量。

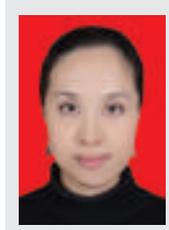
5 结束语

合同能源管理在中国尚属新生事物，但经过几年推广、发展，已经逐步得到认可，市场前景非常诱人。总而言之，由专业节能服务公司出资为企业进行节能改造，让企业在投资很少或不投资的情况下，每年可节省数量可观的能源费，值得在企业推广。

参考文献

[1] GB/T 24915-2010. 合同能源管理技术通则[S].2010.
[2] GB/T 2589-2008. 综合能耗计算通则[S].2008.
[3] GB/T 13234-2009. 企业节能量计算方法[S].2009.
[4] 梁文斌.合同能源管理模式下通信局(站)节能收益测量方法分析[J].电信技术,2011(4).
[5] 周鲜华，徐勃.合同能源管理项目中的收益风险研究[J].沈阳建筑大学学报:社会科学版,2010,12(1):51-53.

作者简介



许璐，现任中兴通讯股份有限公司能源配套市场总监、方案策划部部长、一级主任工程师；研究方向为节能服务技术、开关电源技术、并网发电技术、高压直流等技术领域。

李兆伟，现任中兴通讯股份有限公司能源配套策划总监、二级主任工程师；研究方向为通信电源技术、能源综合方案设计等领域。

刘丽伟，现任中兴通讯股份有限公司能源配套商务总监、二级主任工程师；研究方向为国际贸易实务、融资实务、产品市场价格管理等。

DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2013.03.012
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130426.1049.001.html

基于无线网络性能数据的用户业务行为分类与感知评估技术

Classifying and Evaluating Perceptions of User Services: A Technique Based on Wireless Network Performance

中图分类号:TP393.03 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2013) 05-0056-05

摘要:提供了一种基于无线网络性能数据的用户业务分类方法,同时提供完备的感知分析技术。通过研究各类应用的具体资源占用特征,研究人员设计出有效的业务类型区分方法;同时考察不同应用对各种 KPI 的敏感程度以制订准确的感知评估规则。经过大量测试验证,该方法具有分类评估准确,效率高,处理开销小等优点。

关键词:业务分类;感知评估;无线网络性能;资源占用

Abstract: In this paper, we describe a method for classifying user services. This method is based on wireless network performance and a complete-perception technique. By analyzing the resource occupation feature, we design a method for roughly determining the service type. Using this method, we measure applications against various KPIs in order to build up the accurate perception estimate regulation. Through testing, we verify that this method is capable of accurate classification and high efficiency. It also is not costly to the process.

Key words: service classification; perception evaluation; wireless network performance; resource occupation.

李良斌/LI Liangbin
罗旭耀/LUO Xuyao
(中兴通讯股份有限公司,广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

随着3G应用的推广,无线网络的服务主体逐渐向数据业务转移,越来越多的用户使用无线终端享受数据服务,例如观看视频,浏览网页、QQ或MSN等。每种数据业务的特征不同,对于无线网络的资源占用情况也有很大差异:使用MSN的用户,在线时长往往大于下载文件的用户,但是其流量可能只有下载用户的百分之一,同时不同的业务对于无线环境的要求也不一致。

用户使用业务满意度,是无线网络服务质量的重要指标。为了改善用户使用感受,我们需要了解无线网元上的现有资源是否能够满足用户业务的需要,也就是依赖于用户业务分类和感知评估的方法。传统技术无法做到用户业务分类与无线网络资源分配的无缝关联,例如IP网络监控工具可以在核心网侧监控IP网络的应用协议类型、流量变化等信息,但是却无法获取无线网元资源变化;传统的无线资源管理工具正好相反,它们能够有效地监控所有无线网元的资源分配,却不能探知本网元无线用户的应用业务种类。

收稿日期:2013-03-20
网络出版时间:2013-04-26

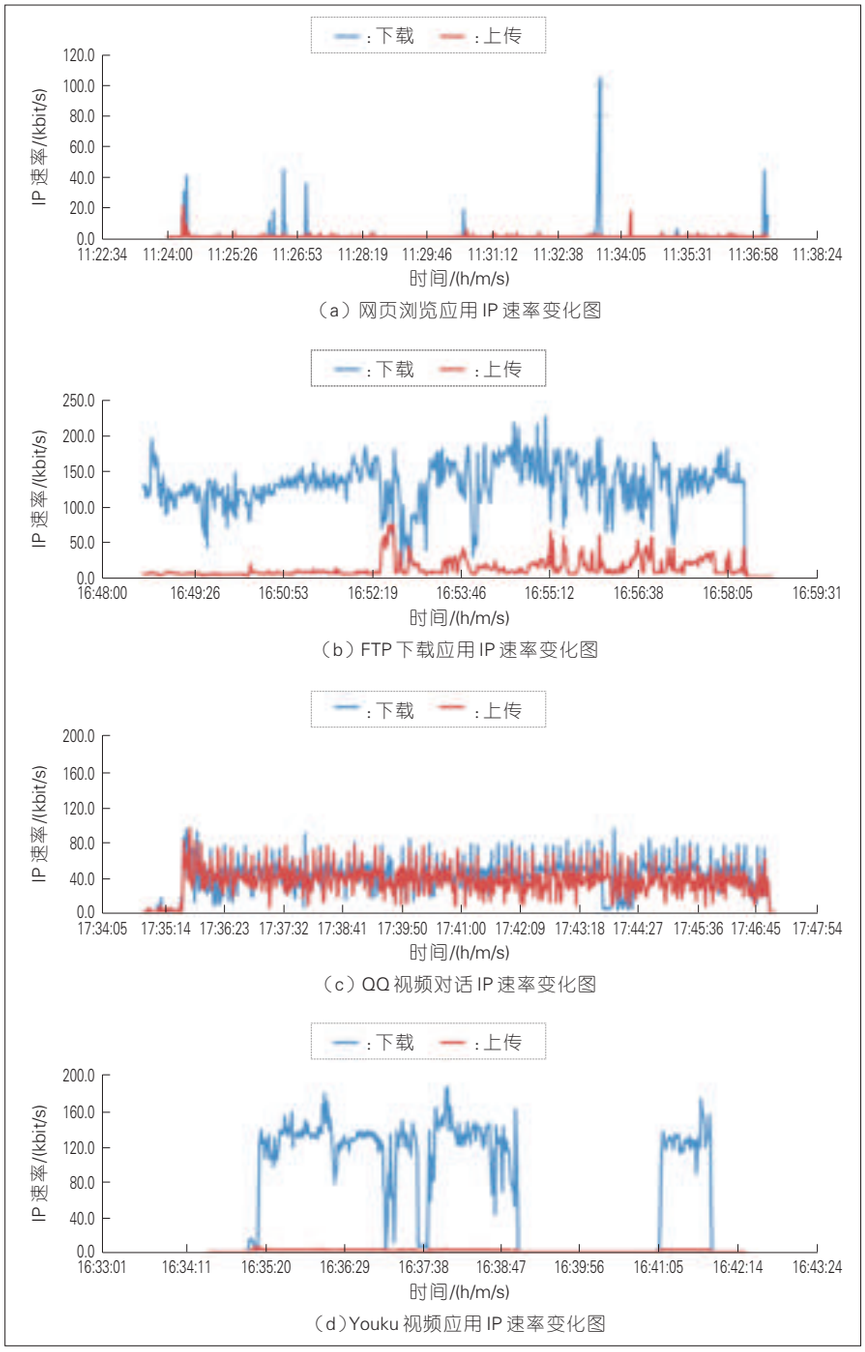
文章讨论了一种基于无线网络数据分析的技术,用于区分网络用户应用的业务类型,并且对其使用感知进行评估[1]。

1 业务占用资源特征

目前主流的网络应用主要有:网页浏览/微博、网络视频、文件传输协议(FTP)/BT下载、视频通话、数据上传以及QQ/MSN等,在此简单例举几种典型网络应用的IP速率变化曲线图,看看这些应用之间是否存在明显差异。

图1描述了多种应用的IP速率变化情况,FTP下载业务的前向IP速率维持在较高水平(>100 kbit/s),反向速率则一般处在低水平(<20 kbit/s),整个下载过程中,前反向速率的变化不大,比较稳定。

图1显示的各类应用的IP速率差异还是比较明显的,当用户进行网页浏览时,IP速率并非持续保持高水平,这与下载应用差别很大;只有在打开新网页或者新的网络资源时,IP速率才会突发到较高水平,整个过程



▲图1 多种应用之间的IP速率对比图

的总前向吞吐量相对下载要小很多。IM即时通讯应用(在此仅限定文字聊天)与网络浏览的特征很像,也存在较长的低速率区间,区别在于IM业务的突发速率要小于网页浏览。因为文字所占的流量非常小,按照两字节的国际标编码计算,一段500字的记录只占约1 kB,而一般门户网站的主页大小都在MB级别。

在视频对话时,前反向速率非常接近,而且都维持在一个"安全"的水平(能够保证对话双方数据正常交互),前向流量一般低于下载业务但是比网页业务要高,反向流量则非常接近前向[2]。

最后,再来比较当下很火的Youku视频应用。它与FTP下载的变化曲线很像,但是仔细研究后发现在几个大"矩形"之间都会存在或多或少的间隔,这是由于网络视频的缓存技术以及用户观看行为导致的。用户在观看网络视频,特别是超长视频时,并不是一次性下载完成整个文件,而是下载分割好了的视频小文件(对于总大小不大的视频不需分割),用户在观看当前文件内容时,有可能该文件早已下载完成,而下一个小文件尚未开始下载,此时就会出现速率间隔。

基于以上分析,可以将网络应用分门别类划分为如下类型。

(1)下载类

主要应用:FTP连续下载、网络视频、BT下载等。

资源占用特征:前向流量大,连接时长较长,需长时间保持高速率。

(2)较大速率突发类

主要应用:Http网页访问、微博等。

资源占用特征:前向流量较大,连接时长短,无需长时间保持高速。

(3)较小速率突发类

主要应用:QQ、MSN文字聊天等IM应用。

资源占用特征:前向流量小,连接时长短,不需要长时间保持高速。

(4)前反向对称类

主要应用:QQ视频、MSN视频、网络电话(VOIP),可视电话等。

资源占用特征:前反向流量相当,连接时长较长,需要长时间保持前反向速率。

(5)上传类

主要应用:反向文件上传,外发邮件等。

资源占用特征:反向流量大,连接时长较长,需长时间保持高速率。

(6)其他类。

主要应用:不属于以上的业务。

资源占用特征:无法归类到前面几项。

某一类业务类型中的所有应用都具有相似的资源使用特征，例如下载类业务，下载流量较大，需要长时间保持较高速率；而较小突发类业务占用的流量非常有限，并且大部分时间不要求保证高速率。如果确定了某次业务的资源占用情况，就能够明确该业务属于以上哪种类型。

2 业务类型判定方法

通过业务的资源占用特征可以推导出本次业务所属的业务类型，如果无线网元侧采集的信息能够充分描述资源占用情况，即可仅通过无线网元数据来确定应用业务类型。

无线网元侧可采集如下数据描述资源占用情况。

- 空口连接时长：空口连接建立到释放之间的时长，对应于应用连接时长。
- 物理层吞吐量：物理层前/反向吞吐量，可以连接用户、网元等多个维度采集。
- 无线连接协议（RLP）层吞吐量：RLP层吞吐量，与物理层吞吐量一样都可表征应用的流量大小。
- 前/反向占空比：高速率持续时长占总连接时长的比例，一般来说，50 kbit/s以上的前向或20 kbit/s以上的反向速率属高速率。
- 前/反向有效速率：数据激活期间的前向和反向速率。
- 前/反向激活时长：无线网元服务时长占总连接时长的比例。

可以通过无线网元采集数据对某次连接的应用业务类型进行判断，各种业务的判定模型说明如下。

（1）下载类

判定模型组成：连接时长、前向占空比、前向流量。

（2）较大速率突发类

判定模型组成：连接时长、前向占空比、前向有效速率。

（3）较小速率突发类

判定模型组成：连接时长、前向占空比、前向有效速率。

较小速率突发业务的前向有效速率要低于较大速率突发业务。

（4）前反向对称类

判定模型组成：前反向吞吐量比例、前反向占空比。

（5）上传类

判定模型组成：反向吞吐量、反向占空比、反向有效速率。

（6）其他类

判定模型组成：不属于以上类型的业务。

可能存在同一连接，同时符合多个业务类型特征的情况，这时需要制定一套优先规则，保证同一连接只能分属一类业务。一种比较合理的优先规则设定如下：

前反向对称 > 持续下载类 > 反向上传 > 较大流量突发 > 较小流量突发 > 其他

根据该规则，假如同一连接同时满足下载类与突发类业务特征，应当将其划分为下载类业务。至此已经确定了每次空口连接的业务类型。

与有线网络承载数据业务有所不同，无线网络资源有限，空口连接在没有数据交互的情况下会进入休眠态。如果休眠时间过长，空口连接则将释放以节约无线资源，降低整个系统的负荷。对于用户来说，仅仅使用了10 min的QQ，可能就包括10余次空口连接。无线网元侧监控的连接与真实的用户应用存在差异。为了解决这一问题，需要通过一定规则将空口连接合并，尽可能还原用户应用的原貌[3]。

图2描述了连接合并的预期效果，虽然用户进行不同应用时，空口连接的频度与时长等特征都不同，但是通过连接合并处理，可以优化从空口信息得到的业务，使其更接近真实的用户应用行为。例如在一次点对点协议（PPP）的对话中，用户进行了多种业务，其中，QQ聊天业务一般包含多次空口连接，且每次连接的时长都很短（可能仅仅是一次文字消息的发送和接收）；而在线电影应用对应的空口连接一般时长较长，最终两类业务经过合并处理后，其结果都更加接近原始的用户应用行为。

值得推荐的一种呼叫连接合并方法是：按照如下规则将所有空口连接划分成呼叫连接集合，之后将单个集合内的所有呼叫合并为一次业务行为。

连接合并条件包括：

（1）属于同一个用户；

（2）属于同一类业务；

（3）相邻两次呼叫中，前一次呼叫释放时刻与后一次呼叫建立时刻之间的时延应当小于预设门限。

呼叫合并的效果如图2所示，相对于原始的空口连接，呼叫合并得到的业务行为更接近与用户的应用。

3 完整的业务分类流程与准确性

文中描述的业务分类方法仅通过无线网元侧采集的空口呼叫数据即可完成，与传统IP网络监控工具不同，不需要额外监控核心网侧数据，进行深入解包（DPI）等操作。

图3展示了业务分类的完整处理流程，具体步骤说明如下：

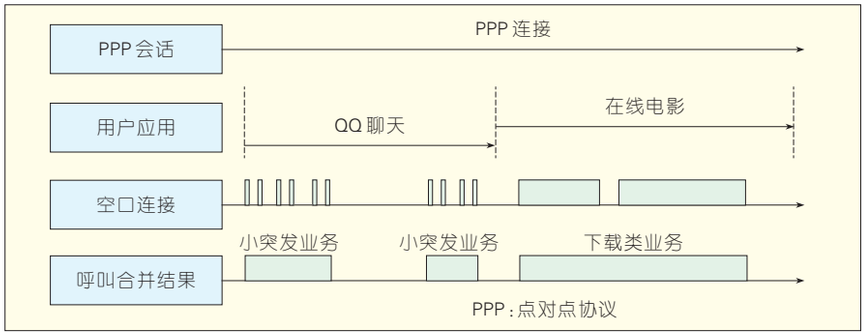
（1）无线网元侧采集用户的空口呼叫信息；

（2）计算每次呼叫的特征关键绩效指标法（KPI），例如呼叫时间、占空比等；

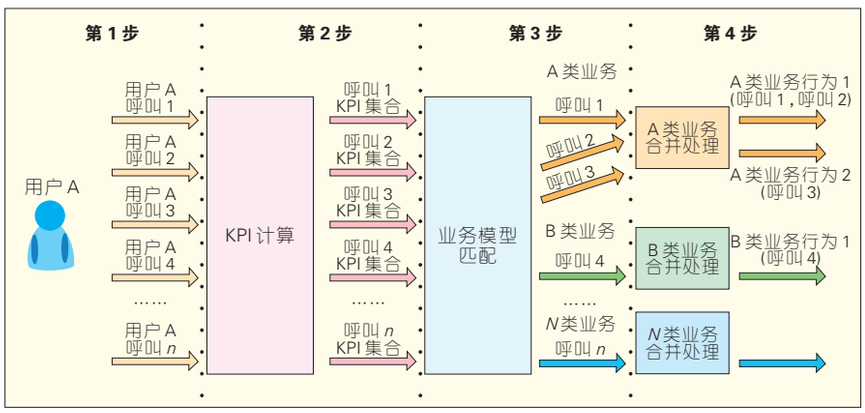
（3）将计算结果与业务模型进行比较，确定所有呼叫的业务类型；

（4）对已经分类好的单次呼叫进行合并，得到更接近用户应用的业务行为。

通过建立业务模型建立无线呼叫KPI与网络应用的对应关系，无线网元采集呼叫指标并以业务模型进行匹配的方法即可实现对业务类型的分类。分类步骤中涉及的所有信息都能够在已有的系统功能下采集完成，无需增加额外的模块设计或核心网的深度解包，开销小、数据可靠性高。



▲图2 连接合并效果图



▲图3 业务分类流程示意图

为了验证业务分类的准确性，测试人员专门在多个城市进行了分类测试，主要结果如表1所示。

表1显示业务分类的判定结果都符合预期，说明使用特征KPI对用户应用进行业务划分具有着较高的准确性。

表2展示的是某基站控制器（BSC）下的全天用户行为分类结果以及各类业务的无线资源占用情况。

在表2描述的某BSC数据中，小突发业务在用户数占比与连接次数占比中都是第一，但是其他的资源占用却非常低；下载类业务虽然不足总连接次数的1%，但是却使用了约60%的前向业务资源与约40%的反向业务资源；而大突发业务各项资源占比则比较统一，基本都能够维持在30%～40%之间。通过分析各类业务的资源占用情况，一方面可以分析各类业务的使用频度，为运营商分析业务发展空间提供指导；另一方面可了解无线资源分布，为网络规划或运营咨费调整等提供帮助。

4 业务评估与用户感知

传统用户感知评估方法的一个重要困难在于不同用户的需求存在差异，同样的环境下，不同用户的感知很可能不同，甚至同一用户在同一环境中不同时段的感知也会变化。业务分类方法能够在很大程度上帮助我们了解用户的具体需求。

对于下载类业务来说，10 kbit/s的有效速率不一定能够带给用户良好的体验，特别是在下载超大文件（>1 GB）时，这种速率简直就不能忍受；但是同样的10 kbit/s有效速率，在进行IM文字聊天时，用户的使用效果却非常好。

业务分类使得准确的感知评估方法实现成为可能。业务感知评估通用公式为：

$$Eva(x)=\sum_{i\in I(x)}E(i)*W(i) \quad (1)$$

在（1）中，$Eva(x)$为业务x的最终评估得分；$I(x)$表示所有与业务x的感知相关的KPI，i表示某项影响x感知的性能指标，有$i\in I(x)$。$E(i)$表示i的得分，不同KPI的评估方法不同，某些负面KPI的评估得分有可能为负分；$W(i)$为指标i的权重，不同KPI的权重也有所差异；对于所有感知KPI得分取加权平均后得到该业务的最终得分。

从不同业务的需求出发，每种业

▼表1 业务分类测试结果

测试项目	判定结果
单/多用户下载 单/多用户在线视频	下载类
Youku视频上传	上传类
网页浏览文本+图片 手机彩信（接收）	大突发
手机彩信（发送）	上传
手机WAP业务	小/大突发
QQ即时聊天 网络休闲游戏（QQ斗地主等） 网络RPG游戏（魔兽世界等） 股票交易（招商证券/同花顺）	小突发
QQ即时聊天+其他应用	其他应用
QQ视频对话	对称类

▼表2 业务占用资源比例

业务类型	用户数占比/%	空口连接次数占比/%	连接时长占比/%	前向时隙占用率/%	反向时隙占用率/%	前向流量占比/%	反向流量占比/%
下载类	8.24	0.47	18.02	59.10	39.79	64.09	43.67
较大速率突发类	29.28	11.29	43.83	34.94	39.91	32.99	35.52
较小速率突发类	60.62	87.82	34.55	3.39	13.01	1.22	5.08
前反向对称类	0.65	0.08	1.36	1.41	3.34	1.04	6.45
上传类	0.43	0.12	0.72	0.28	1.94	0.15	6.87
其他类	0.79	0.22	1.53	0.89	2.02	0.51	2.40

务的具体评估方法应当区别对待，选择合理的KPI组合构建评估系统。同样以下载业务和IM为例，假设两种业务的$I(x)$相同，都为（下载速率，前向重传率，Ec/Io）。

正如表3中，各类KPI对于不同业务感知的影响程度不同，因此E得分相同的不同业务感知得分也可能不同：在两组相同KPI得分的业务中，下载业务得分仅65，而IM业务却高达86。

在得到业务感知评分的基础上，可以进一步分析其用户分布。

图4展示的是某城市下载类业务用户感知分布的真实情况，有约40%的用户体验很差，不足60分，同时也有接近12%的用户下载体验非常好，达到90分以上；其他用户的下载体验处于可接受的水平。通过研究对用户感知的分布，可以分析某地区用户体验的历史变化或者验证网络优化手段是否有效等。

▼表3 业务感知评估示例

业务类型	下载速率权重/%	前向重传率权重/%	Ec/Io权重/%	下载速率得分	前向重传率得分	Ec/Io得分	最终得分
下载	80	10	10	60	80	90	65
IM	10	10	80				86

5 网络优化与故障排查

基于用户感知分数，可以进行多个维度的网络性能统计，例如可以查看所有网元的综合用户感知，对于排名靠后的网元进行深入分析，探索其原因；或者某一类型的终端进行感知评比，看看此类终端感知是否良好。

此外，可以设计追踪系统，从用户感知评分入手，迅速锁定导致评分差的主要感知KPI，快速定位问题。一旦发生性能类或用户感知故障，即可定位出劣质的感知KPI，并深入分析其发生原因。

例如，下载类业务的重要一项感知KPI为前向RLP速率，一旦发现该感知指标差，可通过固化的分析专题（例如空口覆盖、呼叫成功率、掉话原因等分析专题），对影响指标的原因，包括空口环境，系统忙闲，上层资源带宽等进行深入挖掘。

基于用户感知的故障排查系统与传统排障方法的差异主要包括：

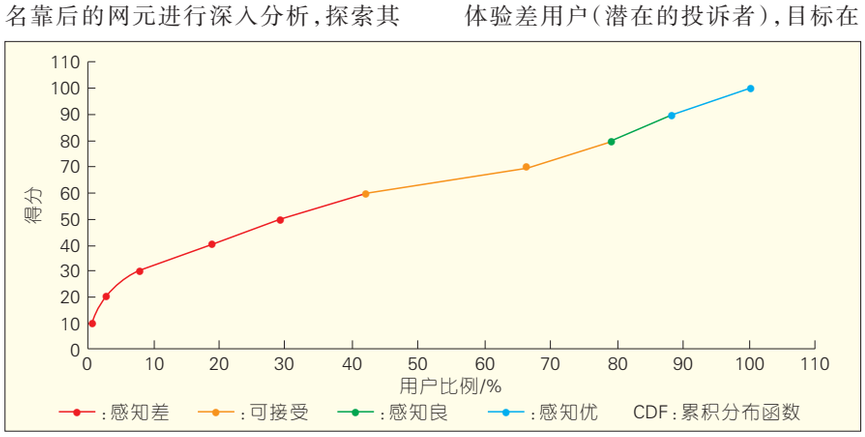
（1）传统排障方法

该方法通过用户投诉或者系统告警发现故障，属于被动式发现；主要定位手段为人工方法，通过对历史数据的排查进行分析，对于人员的业务技能要求较高，同时由于前后方数据交互的时延，故障数据采集效率等因素，定位效率较为低下。

（2）用户感知排障方法

该方法通过用户感知评估，发现体验差用户（潜在的投诉者），目标在其投诉前就定位解决问题，属于主动式发现；在评估的同时可以监控到影响体验的劣质KPI，快速锁定故障范围；基于既有数据可设计固化的分析专题，自动化定位问题根源，摆脱了对人员技能的依赖。

对比可知，基于用户感知评估的排障方法相比传统方法效率要高得多，并能够在用户投诉或系统告警前就预先发现问题，可靠性大大提高。



▲图4 下载类业务用户感知CDF曲线图

6 结束语

随着无线数据业务日益扩展，准确判定无线用户业务类型与评估其使用感知的需求也日益迫切，另外传统方法侧重于有线侧深度解包，不能反映无线行为的特征，也无法有效监控用户感知。文中提供的技术实现了无线网络资源分配与数据业务之间的无缝关联，不但满足以上需求，而且有着极高的扩展性，在网络优化与系统故障排查等方面都有不俗的表现。

参考文献

[1] 3GPP2. C.S0024-B v3.0 [S]. cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification. 2012.

[2] Brigitte Boothe. Perception, evaluation, interpretation[S].Hogrefe & Huber, 1995.

[3] Munir SA, Xie DL, Chen CF, Jian M. Virtual Overlay for Service Classification & Discovery in Wireless Sensor Networks[C]//Proceeding of the International Conference On Advanced Communication Technology, VOLS I-III, 2009:991-996.

作者简介

李良斌，南京电子工程研究中心硕士毕业；中兴通讯无线研究院一级主任工程师、项目经理；十多年长期从事3G、4G系统无线关键技术和网络优化研究；拥有国际专利2项，国家专利15项。

罗旭耀，中山大学硕士毕业；中兴通讯股份有限公司通信协议软件开发工程师；长期从事无线网络性能与通信协议研究；拥有国际专利2项，国家专利7项。

DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2013.05.013
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20130827.0930.001.html

近场通信技术 2

孙成丹/SUN Chengdan，彭木根/PENG Mugen
(北京邮电大学信息与通信工程学院,北京 100876)

[编者按]近场通信技术近年来逐渐受到人们的关注,相关的技术标准和协议规范也日臻完善。讲座将分3期对该技术进行介绍:第1期讲述近场通信的背景及概况,概述性介绍近场通信技术的技术架构;第2期对近场通信的具体技术规范做详细介绍,包括数字协议规范、相关动作规范、逻辑链路控制协议、标签类型及数据交换格式;第3期介绍近场通信的安全技术、设备的连接切换规范和业务应用。

中图分类号:TP393.03 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2013) 05-0061-05

近场通信技术的技术架构包含多方面的协议规范,完整掌握其技术架构对于全面认识NFC技术至关重要。本期将依照其技术架构介绍近场通信技术的各协议规范内容,包括数字协议规范、相关动作规范、链路控制协议、近场通信的标签和数据交换格式。上一期介绍了近场通信的概况,描述了NFC的整体技术架构;下一期将介绍近场通信的安全技术、设备连接切换规范,和NFC的业务与应用情况。

3 近场通信技术规范解析

3.1 数字协议规范

数字协议规范主要定义了用于完成通信的构件,是实现ISO/IEC 18092和ISO/IEC 14443标准中数字技术的规范。主要包括调制机制、比特级编码、比特速率、帧格式、相关协议和命令集。在该规范中也定义了一些可选项,实现时可自主选择,如果选择实现这些可选项则必须符合规范中指定的需求[3]。

数字信号的比特周期为1 bd = 128/($D \times f_c$)。f_c为载波频率13.56 MHz,D依赖于所选择的比特速率,取值范围为1/2/4/8/16/32/64。

在规范中定义了专有名词——技术,分为NFC-A技术、NFC-B技术和NFC-F技术。

NFC-A技术下的序列格式要求为:轮询模式向监听模式传输的模拟信号需要对改进的密勒码进行100%幅移键控(ASK)调制,改进的密勒码定义了3个特定的图案X/Y/Z,这3种图案按照需求编码为逻辑0和逻辑1;监听模式向轮询模式传输的模拟信号需要对曼彻斯特码进行二进制启闭键控(OOK)子载波调制,密勒码也定义了3种特定图案D/E/F,图案D和E按照需求编码为逻辑0和逻辑1;NFC-A技术不需要信号同步,因此没有开始符(SoS)标识,并由终止符(EoS)标识指示序列结束[4-5]。

在NFC设备间传输的数据被划分为帧。每种技术对应的帧格式各不相同。NFC-A技术通过在数据比特前后加上开始帧(SoF)和结束帧(EoF)来形成帧,同时每隔8 bit末尾加一位奇偶校验位P。NFC-A技术使用3种帧结构:短帧、标准帧和比特导向的信号设备识别(SDD)帧。短帧用于初始化通信,作用于唤醒阶段;标准帧用于数据交换;比特导向SDD帧用于冲突解决。

NFC设备间交换的净负荷由命令及相应的响应组成。采用NFC-A技术的设备常用的命令及含义包括:ALL_REQ用于唤醒全部请求,SENS_REQ用于检测请求,SDD_REQ用于单设备检测请求,SEL_REQ用于选择请求,SLP_REQ用于睡眠请求。

NFC-B技术下的序列格式要求为:轮询模式向监听模式传输的模拟信号需要对非归零电平编码(NRZ-L)进行10%ASK调制;监听模式向轮询模式传输的模拟信号需要对NRZ-L码进行二相相移键控(BPSK)调制;NFC-B技术支持信号同步,因此信号以SoS标识开始,由EoS标识指示序列结束。

采用NFC-B技术的设备用于传输数据的帧由字符构成。一个字符由逻辑0开始,逻辑1作为结束,中间

收稿日期:2013-06-07
网络出版时间:2013-06-25
基金项目:国家科技重大专项课题(2012ZX03001037-004, 2012ZX03001028-04, 2012ZX03001031-004);北京市科技新星合作项目(xxhz201201)

包含8位数据比特。

NFC-B设备间交换的净负荷由命令及相应的响应组成。采用NFC-B技术的设备常用的命令及其含义为:ALLB_REQ和SENSB_REQ用于轮询模式下的设备侦测操作域,SLOT_MARKER用于轮训模式下的设备在冲突解决期间定义响应时隙的开始,SLPB_REQ用于睡眠请求。

NFC-F技术下的序列格式要求为:在两个传输方向上传输的模拟信号均采用对曼彻斯特码进行ASK调制的方式传输。NFC-F技术的帧的字符有8位数据bit组成,不包含起始位、结束位和奇偶校验位。字符之间没有分隔符,被当做连续的字符串来传输。

采用NFC-F技术的设备使用SENSF_REQ命令探测操作域。SENSF_RES为相应的响应。

3.2 相关动作规范

本节描述了NFC设备如何利用数字协议规范与其他设备建立通信,介绍了这个过程中的一系列动作。我们分监听模式和轮训模式两种情况进行介绍。

在监听模式下,运行监听模式状态机之前需要设置相应的配置参数。我们将给出一些常用的相关参数信息。

- CON_LISTEN_DEP_A参数,大小为1 bit二进制位,用于控制是否监听支持NFC的数据交换协议(NFC-DEP)的NFC-A技术,1表示监听相应的NFC-A技术,0表示不监听相应技术。
- CON_LISTEN_DEP_F参数,大小为1 bit二进制位,用于控制是否监听支持NFC-DEP的NFC-F技术,1表示监听相应的NFC-F技术,0表示不监听相应技术。
- CON_LISTEN_T3TP参数,大小为1 bit二进制位,用于控制是否监听支持第三类标签平台的NFC-F技术,1表示使能监听,0表示禁止监听。
- CON_LISTEN_T4ATP参数,大小为1 bit二进制位,该位为1表示监听支持第四类标签平台的NFC-A技术,该位为0表示禁止相应功能。

其他常见的参数还包括CON_LISTEN_T4BTP、CON_BITR_F、CON_ADV_FEAT、CON_SYS_CODE、CON_SENSF_RES、CON_ATR_RES、CON_SENSB_RES、CON_ATTRIB_RES和CON_ATS,除CON_BITR_F之外的参数均为字节矩阵变量,CON_BITR_F为以字节的整型参数,当设备选择212 kbit/s速率时,该字节的第2位必须设置为1,当设备选择424 kbit/s速率时,字节的第3位必须设置为1。需要说明的是,在NFC-B和NFC-F技术下,当需要发送多个响应时,处于监听模式的NFC设备在单个时隙中应该只发送一个响应,通过多个时隙来完成多响应的发送工作。如果处于监听模式下的NFC设备对单个轮询命令做出多个响应,那么该设备必须为每个响应预知配置参数,或者当所有响应均不能发送时,设备需要预知对应的标准以决定发送哪个响应子集。在监听模式下,NFC设备支持CON_LISTEN_DEP_F和CON_LISTEN_T3TP参数,则依据需求该设备实现两个独立的状态机[6]。

在轮询模式下,设备必须进行射频域冲突规避功能。首先,设备需要在$T_{ID}+n\times T_{RFW}$时间内感知是否存在远场磁场。如果在上述时间内未检测到远场磁场,则设备进入下一步,若检测到磁场则NFC设备判定射频域冲突,需要进行冲突规避。其中,T_{ID}必须大于4 096/fc,T_{RFW}等于512/f_c,整数n在0~3间随机产生。冲突规避流程如图5所示。

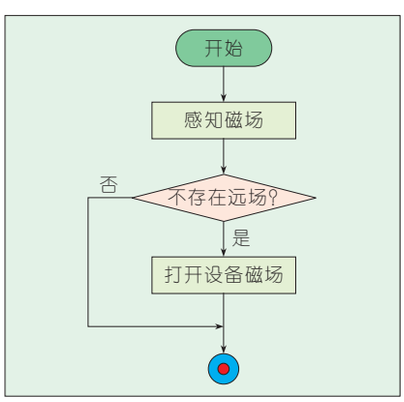
常用的动作包括:技术侦测、冲突辨析、设备激活、数据交换和设备去激活。技术侦测用于当前设备侦测其范围内的设备及所采用的技术。在侦测设备所使用的技术时,固定按照NFC-A、NFC-B、NFC-F的顺序轮询。冲突辨析动作用于设备识别当前范围内与其支持相同技术(及NFC-A/NFC-B/NFC-F)的设备。设备激活用于从技术侦测阶段和冲突辨析阶段识别的设备集中激活某个设备。这个过程也与设备所使用的具体技术相关。数据交换动作,使得当前设备基于NFC协议规范可以与范围内的设备进行数据交换并完成通信。这个过程需要考虑到设备所采用的标签类型平台。设备去激活的作用是:通过基于NFC规范的通信过程,对当前设备范围内的某个NFC设备进行去激活操作。

3.3 逻辑链路控制协议

这一章中我们将介绍NFC协议中逻辑链路控制层(LLC)的部分功能、特征及相关协议。LLC层构成了开放式系统互联(OSI)模型中数据链路层的上半层,下半层由媒体介入控制层(MAC)构成。MAC层和LLC层通过一系列映射实现两者之间协议的绑定。

逻辑链路控制协议的主要特点包括以下几点:

- 链路激活、管理与去激活。逻辑链路控制协议(LLCP)说明了处于通信范围内的两个NFC设备如何识别协议的兼容性,如何建立LLCP链路,协议也包括如何管理与远端对等设备的连接,在需要的情况下可以对链路实行去激活操作。
- 异步均衡通信。传统上,在MAC层只有发起者能开始发送数据



▲图5 冲突规避流程

和请求数据，而LLCP协议通过使用对称机制可以实现对等设备间的异步平衡模式(ABM)。通过ABM，服务端点可以在认识时刻进行初始化、管理、回复、发送信息等操作。

• 协议复用。LLCP可以同时容纳多个高层协议。

• 无连接传输。该模式允许用户进行无连接的数据传输服务。当上层协议使用自身的流控制协议而不需要依靠链路的流控制机制时可以使用这种传输模式。

• 面向连接传输。这种模式可以使得用户间进行可靠的数据传输。业务流量通过滑窗协议的编号机制得以控制。面向连接的传输模式需要在进行数据传输前先行建立链路连接并且在连接持续期间始终保持资源分配。

逻辑链路控制协议可以划分为以下几个逻辑组件：

• MAC层映射。该层映射将现有的射频(RF)协议集成到LLCP架构中。

• 链路管理组件。该组件负责所有面向连接和无连接的逻辑链路协议数据单元(PDU)交换的有序进行，以及完成小PDU的聚合与解聚操作。该组件也确保异步平衡模式通信的完成，并且可以实现对链路状态的监测。

• 面向连接传输组件。该组件完成面向连接的数据交换，也包括连接的建立和结束。

• 无连接传输组件。该组件完成无连接的数据交换。

各组件的结构如图6所示。

根据LLC层的数据传输形式，NFC设备可以分为3类：仅提供无连接传输服务的设备为第1类链路服务；仅提供面向连接传输服务的设备为第2类链路服务；同时提供无连接和面向连接传输服务的设备为第3类链路服务。

逻辑链路控制层的PDU格式中包括目的地址域、PDU类别域、源地址域、序号域和信息域5部分。

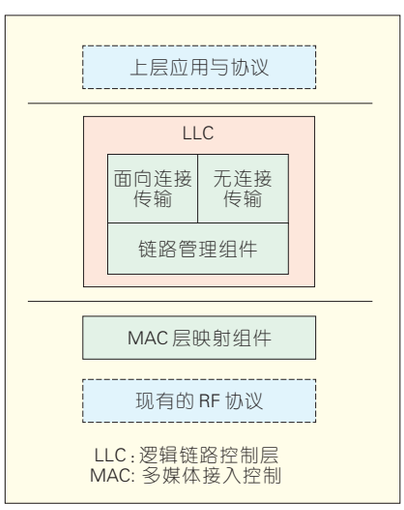
地址域(目的地址和源地址)长度为6 bit位，用于表征数据传输的终点和起点。其中，0号地址用于指定LLC链路管理组件，不应用于指定任何特定的服务接入点；1号地址用于为服务发现协议(SDP)指定知名的服务接入点；2—15号地址为NFC论坛号码分配寄存器中指定的知名服务接入点留用；16—31号地址由局部LLC分配给在局部服务环境下注册的服务；32—63号地址由本地LLC按照上层服务请求进行分配，不应用于SDP协议的发现功能。

PDU类别域长度为4 bit位，用于为PDU其他域指明语法和语义，每一个值对应一种PDU类别。其中值1111b预留用于未来LLCP头格式的扩展。

序号域在包含序号的PDU中长8 bit位，不包含序号的PDU中没有该域。该8 bit经常分为两个4 bit子域，分别指明发送序列号和接受序列号。

信息域大小为$M \times 8$ bit，M变化范围为0至最大信息单元(MIU)。信息域可以为空，即不传输任何有用的信息。

LLC层过程主要包括链路激活过程、常规操作过程、链路去激活过程、无连接传输过程、面向连接传输过程、聚合过程、对称过程和服务发现过程[7]。



▲图6 LLCP组件架构

3.4 标签类型

近场通信技术的关键要素之一，在于NFC装置与无源NFC标签沟通的能力。NFC技术的这一特征，是未来许多应用得以实现的关键。NFC标签正在被大量生产并应用在全球若干个领域。为了支持未来标签的大规模应用，标签的定义必须清晰，以确保不同制造商的标签与设备达到兼容。

NFC标签是无源装置，可以实现与有源NFC设备(有源NFC读写器)通信，NFC标签可以在以下领域中获得应用，如智能海报以及其他储存小量数据并传输到主动式NFC装置的场合。在智能海报应用中，起作用的部分可用来作为与主动设备的接触点。NFC标签所储存的数据可以是任何形式的数据，但通常情况下是用来贮存网址(URL)以供NFC装置找到进一步的信息。因为所需存储交换的数据量很少，故可使用NFC标签来实现。

为了规范化有源NFC读写器与无源标签之间的通信，NFC论坛在2006年6月推出了其第一个标准技术架构和NFC设备需满足的技术标准，包括：NFC数据交换格式(NDEF)、3种记录类型定义(RTD)。这些技术可以用于智能海报、文本、互联网资源读取应用。

NFC论坛定义了4种基本的标签类型，用1—4来标识，每种标签类型对应不同的格式和容量。这些标签类型格式的基础是：ISO 14443的A类型与B类型、Sony FeliCa，前者是非接触式智能卡的国际标准，而后者符合ISO 18092无源通信模式标准。

在标签类型的设计中需要最大限度保持NFC标签简单性，其优势在于：这些标签在很多应用中仅作一次性使用，通常嵌入在海报中，而这些海报的生存周期及其所包含的信息的有效性很短。

各种类型的标签的定义如下。

(1) 第1类标签:此类标签基于ISO14443A标准。此类标签具有可读功能和重新写入功能,用户也可根据需要将其配置为只读模式。该类标签存储能力为96字节,足以用来存网址URL或其他少量数据。然而,如果用户需要,内存大小也可被扩充到2 k字节。此类NFC标签的通信速度为106 kbit/s。因为此类标签的简洁性,故其成本低廉,适用于许多NFC应用场合。

(2) 第2类标签:除基本内存大小改为48字节,与第1类标签无异。

(3) 第3类标签:NFC第3类标签基于Sony FeliCa体系。目前另3类标签具有2 k字节的内存容量,数据通信速度为212 kbit/s。尽管标签成本较高,但是此类标签更适合较复杂的应用场景。

(4) 第4类标签:依据定义,此类标签与ISO14443A、B标准兼容。在生产过程中此类标签已经被预配置为可读/可重写模式或者只读模式。该标签的内存容量可以达到32 k字节,并且其通信速度介于106 kbit/s和424 kbit/s之间。

从上述不同标签类型的定义可以看出,标签类型1和2与标签类型3和4在内存容量、构成方面大不相同。因此它们的应用场合不大可能有很多重叠。此外,第1与第2类标签是双态的,可根据需要配置为读/写模式或者只读模式。而第3与第4类仅具有只读功能,数据在生产时已经写入或者可通过特殊的标签写入器来写入。

NFC标签是无源装置,不需要独立供电。标签从读写器获得很小的电源即可驱动标签的电路,通过负载调制等技术将少量的信息传输到读写器,完成交互。这些数据可能是少量的文本或其他数据,虽然数据量很小,却可能通过仅有的数据把设备导向到某个URL以获得更多的信息。

NFC标签设计与制造需要考虑很多方面。需要在保持性能的前提下,实现低成本大规模的批量制造。因此在设计标签时,需要考虑下面几个关键的性能参数与要素。

(1)读取速度:因为需要在两个NFC装置接近时传输标签所含的所有数据,故速度因素很重要。如果标签传输速度较慢,数据就不能及时传输,导致可靠性降低。第一类NFC标签允许将所有数据整块传输,这大大保持了标签的读取性能。

(2)芯片尺寸:在NFC标签的设计中芯片尺寸非常重要。尺寸较小,则成本较低、标签也不会显得很突兀(这对标签在智能海报中的应用尤为重要)。很明显,较小的内存自然会降低晶片尺寸。

(3)单位价格:鉴于NFC标签的目标应用是成本低廉的场景(例如用于智能海报),单位价格是标签设计极其重要的一个因素。标签成本受一系列因素影响,诸如内存大小和因包含附加特征带来的集成电路的复杂性。把内存和包含的特征尽可能简化,就可以有效降低成本。

3.5 数据交换格式

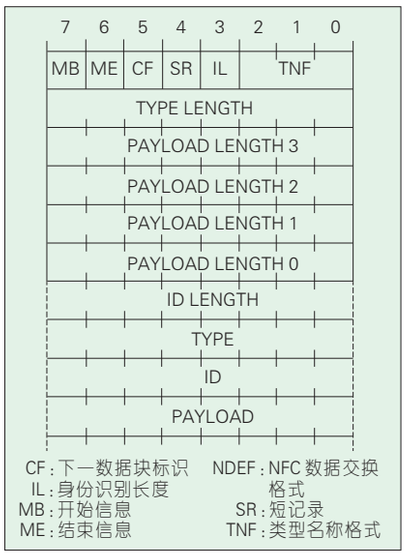
NFC数据交换格式(NDEF)定义了NFC设备之间以及设备与标签之间传输数据的一种消息封装格式。NDEF是轻量级的紧凑的二进制格式,其协议规范认为设备之间传输的信息可以封装成一个NDEF消息,而一个消息可以由多个NDEF记录构成,每条记录包含一个有效载荷,记录中通过3个参数来描述该负荷,分别是类别标识、长度标识、其他可选标识构成。类别标识可以是通用资源标识符(URI)、多用途互联网邮件扩展(MIME)媒质或者NFC自定义的数据类型。使用NFC定义的数据类型,载荷内容必须被定义在一个NFC记录类型定义(RTD)文档中。负荷长度是一个八进制整数用来表征负荷中八位字节的数量,且对非常小的有效负荷需要采用紧凑的短型布局。而可选标识可以实现净负荷间的复用和交叉引用。

NDEF消息由一个或多个NDEF记录构成。消息中的第一个记录由开始信息(MB)标记表示,最后一个记录由结束信息(ME)标记表示。最小的消息只包含一个记录,此时MB标记和ME标记被设置为相同的值。如果对净负荷进行分块操作,则为了对净负荷块进行编码,至少需要两个记录块。需要说明的是,规范对于NDEF消息中支持的最大NDEF记录数未作规定。多个NDEF消息间不能重叠,即MB标记和ME标记不能用于对NDEF消息嵌套,MB标记放置在第一个记录中,ME标记放置在最后一个记录中。实际中,NDEF记录中并不包含序号,响应的顺序是由记录的序列化顺序隐性表示。

一个记录块承载一块净负荷,通常需要对净负荷分块,这样可以将动态生成的内容或者非常大的实体分割成同一NDEF消息中序列化表示的多个记录块。分块并不是将复用机制和数据流机制引入到NDEF中,它是一种减少数据生成端带外缓冲需求的机制。一个NDEF消息包含0个或多个分块的净负荷,每一个分块后的净负荷按顺序编码成初始记录块、中间记录块和截止记录块。并且,分块后的净负荷一定要封装在同一个NDEF消息中,即一个净负荷不能同时存在于多个NDEF消息中。

NDEF记录的传输次序由8位字节的位置决定。如果将一组8位字节放在网格中,则这些8位字节的传输顺序为:首先自左向右,随后自顶端至底端。如果一个8位字节表示一个数字量,则该字节最左端的bit位作为最高有效位(MSB),如果用多个8位字节组成的域来表示数字量,则该域的最左端bit为最高有效位。NFC规范中规定使用大端法传输这些数字量,先传送最高有效位。

NDEF记录长度可变,且每个记录包含多个头部域和有效负荷,图7



▲图7 NDEF记录布局

展示了NDEF记录布局。各头部域标记的功能如下。

• MB:长度为1 bit位,置为1表示NDEF消息开始。

• ME:长度为1 bit位,置为1表示NDEF消息结束。如果对净负荷分块,则仅在该净负荷的最后一个记录中将ME置为1。在中间记录位置上的MB和ME均为0。

• 下一数据块标识(CF):长度为1 bit位,置为1则表示存在着下一个记录。

• 短记录(SR):长度为1 bit位,置为1表示有效荷载长度域只有一个8位字节。该标记用于少量净负荷情况下的紧凑封装。

• 身份识别长度(IL):长度为1 bit位,置为1表示头部身份识别长度(ID_LENGTH)有效且为1个字节长,置为0表示记录的头部中不包含ID_LENGTH域和ID域。

• 类型名称格式(TNF):长度为3 bit位,表示8种类型格式。0x00表示记录中ID和负载域为空;0x01表示NFC论坛已定义的记录类型;0x02表示RFC2046中定义的媒体类型;0x03表示RFC3986中定义的URI类型;0x04表示NFC论坛外部类型;0x05表示未知类型;0x06为不可随意改变的类型;0x07作为保留值,有待研究。

• TYPE_LENGTH:长度为8 bit位的无符号整数,以字节为单位指定TYPE域的长度。对于TNF域中的值,TYPE_LENGTH总是置为0。

• ID_LENGTH:长度为8 bit位的无符号整数,以字节为单位ID域的长度。只有记录头部中的IL标记为1时该域才有效。允许ID_LENGTH为0,此时表示NDEF记录中不包含ID域。

• PAYLOAD_LENGTH:使用无符号整数表示PAYLOAD域字节长度。该域大小由SR标记决定。SR = 1,PAYLOAD_LENGTH是一个单个字节,表示无符号8位整数;SR = 0,该域大小为4字节,表示一个32位无符号整数。

• TYPE:该域的值用来指示净负荷的类型。其值要遵循TNF域所指定的结构、编码方式和格式。

• PAYLOAD:该域承载NDEF用户应用的数据,其外部结构对于NDEF是非透明的。

最后,需要强调的是,在NDEF标识符的设计中需要考虑国际惯例,以增加标准的实用性和统一性。比如,在URI与MIME媒体类型标识符的实现中,就需要参考RFC2718、RFC2046/RFC2047都能够标准。 (待续)

参考文献

[3] NFC Forum. Connection handover technical specification 1.2[S]. 2010.
[4] NFC Forum. NFC activity specification technical specification 1.0[S]. 2010.
[5] NFC Forum. Logical link control protocol technical specification 1.1[S]. 2011.
[6] NFC Forum. Type 1 tag operation specification technical specification 1.1 [S].2011.
[7] NFC Forum. Type 2 tag operation specification technical specification 1.1[S]. 2011.

作者简介

孙成丹,北京邮电大学在读硕士研究生,目前主要研究方向为无线网络信息理论和关键技术。

彭木根,北京邮电大学教授、博士生导师,IEEE高级会员;主要从事为时分双工无线网络信息理论、协同网络编码、无线网络自组织技术、TDD高能效无线传输和组网技术、TD-SCDMA及增强演进系统的传输和组网增强技术的研发工作;荣获高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)技术发明奖一等奖、中国通信学会科技进步奖二等奖和北京青年优秀科技论文奖二等奖,国际学术会议最佳论文奖3次;在国际著名学术期刊发表SCI学术论文约50篇,获得授权发明专利30余项,提交标准技术文稿30余篇,出版学术专著和译著10余部。

综合信息

中国光纤敷设超过6亿芯千米 接入覆盖用户过亿

在2013年9月4日下午举行的"2013光通信技术和发展论坛"上,武汉邮电科学研究院原副院长、总工程师、中国通信学会光通信委员会主任毛谦表示,2012年全球光纤用量已达到2.36亿芯千米,光纤累计用量已超过18亿芯千米。中国光纤用量约1.16亿芯千米,已敷设光缆长度到1 491万km,已敷设光纤超过6亿芯千米。

庞大的网络规模相对应的是全球宽带用户的快速增长。截止到2012年底,全球宽带用户超过6.48亿,其中FTTx用户为1.28亿;截止到2013年7月份,中国宽带用户约为1.83亿,光纤宽带用户达3 159.5万户,光纤接入覆盖超过1亿户。 (转载自C114中国通信网)

2014年第1—3期专题征文

第1期 社会网络：技术、应用与市场

专题策划人

南京邮电大学通信与信息工程学院 王玉峰 教授

大规模在线社会网络（OSN）和虚拟社区的研究和应用取得了极大的发展，它已经拥有了巨大的用户群体（世界上超过一半的Internet的用户在使用在线社会网络）。而各种移动终端的快速增加，尤其是智能手机的普及以及传感器网络的大规模应用，使人们生活在一个以移动设备为中心的社会中，很多OSN站点已经扩展到移动终端上。社会网络极大地改变了社会行为以及人们的社会生活方式惯，并对传统内容、媒体和通信产业带来深远的影响。

本次征文将对这个学科交叉的领域，进行全面、深入的刻画描述，包括基本理论、关键问题、典型应用、市场模型和盈利机制等。

专题文章范围主要包括：

- 社会网络的测量、分析和建模
- 社会网络中的数据挖掘
- OSN相关的隐私问题和策略
- 基于社会网络的市场推广
- 社会网络中的盈利模式
- HCI设计
- 社会网络的消息扩散

第2期 第5代移动通信需求与技术探索

专题策划人

清华大学信息技术研究院 王京 教授

随着移动通信用户数量的增加，特别是移动互联网业务的普及，未来10年移动通信的数据量将有1 000倍的急剧增长。为了满足这样的需求，我们的工作将主要围绕3个技术方面：在扩展频谱应用方面，一方面要发掘新的频谱资源以拓展频谱带宽，另一方面也更加注重提高对现有频谱的使用效率；在空口技术方面，需要进一步研发新的无线传输技术，提高频谱效率；在网络技术方面，需要进一步提高小区密度，并综合考虑多层次覆盖、多制式共的异构网络，从而提高单位面积内的吞吐量。

专题文章范围主要包括：

- 总体技术研究
- 无线传输技术研究
- 无线组网技术研究
- 测试技术研究

第3期 网络以及功能虚拟化

专题策划人

电子科技大学通信与信息工程学院 虞红芳教授、李乐民院士

随着通信网络规模的持续增长，以及各种新型应用和服务在现有网络上大规模部署，传统网络的数据传输方式对未来网络技术的创新和发展形成了严重阻碍。当前网络的规模和基础设施框架已经无法满足新技术和应用的需求。被广泛认为是未来网络技术发展趋势的网络虚拟化为解决当前网络存在的问题提供了一条有效的途径。同时，由电信网络运营商发起的网络功能虚拟化（NFV）很有可能为电信网络的建设和运营方式带来巨大变化。网络功能虚拟化提供了一种基于标准化的方式来对一系列的电信应用程序进行虚拟化，使得它们可以运行在符合行业标准的服务器上，从而加速了业务和应用的部署。本专题将结合网络以及功能虚拟化的最新发展，深入而广泛地探讨在不同网络环境下的网络以及功能虚拟化技术及应用。

专题文章范围主要包括：

- 下一代互联网中的网络虚拟化技术
- 基于SDN的网络虚拟化研究现状和趋势
- 云计算下的网络虚拟化解决方案
- 虚拟网络映射技术研究
- 移动网络中的虚拟化应用研究
- 网络功能虚拟化NFV标准化介绍

2014年第1—6期专题计划

期次	专题名称	专题策划人
1	社会网络：技术、应用与市场	南京邮电大学通信与信息工程学院 王玉峰 教授
2	第5代移动通信需求与技术探索	清华大学信息技术研究院 王京 教授
3	网络以及功能虚拟化	电子科技大学通信与信息工程学院 虞红芳 教授、李乐民 院士
4	智慧城市	上海信天通信有限公司 祁庆中 总经理
5	下一代无源光网络技术与应用	北京邮电大学信息光子学与光通信研究院 陈雪 教授
6	可见光通信技术	上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 陈建平 教授