



基于 SDN 的云数据中心 *

饶少阳¹, 陈运清¹, 冯 明²

(1. 中国电信股份有限公司北京研究院 北京 100035; 2. 中国电信集团公司 北京 100032)

摘 要: 移动互联网、云计算等新型业务的高速增长,一方面促使传统的 IDC 向云计算数据中心转变,另一方面越来越多的应用和数据集中到云端,使得云数据中心的规模急剧增长,传统网络架构和技术已经难以适应云数据中心的发展,如多租户网络隔离、地址复用、VPC(虚拟私有云)、东西向流量控制、QoS 和安全控制、自动化网络配置以及大二层网络需求等。SDN 作为近期兴起的一种新型网络技术,被认为是解决云数据中心诸多网络问题的重要手段。首先分析云计算引入对数据中心网络带来的主要挑战和问题,然后提出解决这些问题的思路;在比较几种业界主流 SDN 技术方案后,提出了基于 overlay SDN 的云数据中心网络解决方案,并深入分析了其实现原理;最后探讨了云数据中心网络的发展趋势。

关键词: 云计算;云数据中心;软件定义网络;网络虚拟化;多租户网络

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.006

Cloud Data Center Based on SDN

Rao Shaoyang¹, Chen Yunqing¹, Feng Ming²

(1. Beijing Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100035, China;

2. China Telecom Corporation, Beijing 100032, China)

Abstract: Along with rapid growth of mobile internet, cloud computing and other new services, on the one hand, the traditional IDC is being transformed to cloud computing data center, on the other hand, more and more applications and data are coming to be carried on the cloud, which makes the scale of cloud data centers substantially increase, while the traditional network architecture and the technologies has been difficult to adapt to the development of the cloud data center. As a recent rising new network technology, SDN is considered to be an important mean to solve many network problems of cloud data center. Major challenges and problems of data center network were analyzed after introducing cloud computing and then proposals to solve them were given. After comparing several classic SDN technologies, the solution of cloud data center network based on overlay SDN was proposed, and its implementation principle was deeply analyzed. Finally, the development trend of the cloud data center network was discussed.

Key words: cloud computing, cloud DC, software defined networking, network virtualization, multi-tenant network

1 云数据中心及面临的网络挑战

云数据中心是伴随着云计算发展而出现的新型数据中心。IDC 是提供互联网基础设施托管服务的数据中心,而云数据中心是提供基于云计算的基础设施、平台和应用软件按需、弹性租用服务的数据中心。IDC 提供商为每个

用户提供的主要是机房环境和网络出口服务,大部分用户都自行部署计算、存储和网络基础设施,并通过 IDC 提供的出口带宽对外提供服务;而在云数据中心中,用户可以按需订购计算、存储和网络资源,不需要自己部署计算、存储和网络基础设施,用户应用和数据承载在由服务商统一部署的资源池中。如图 1 所示,云数据中心和 IDC 的多租

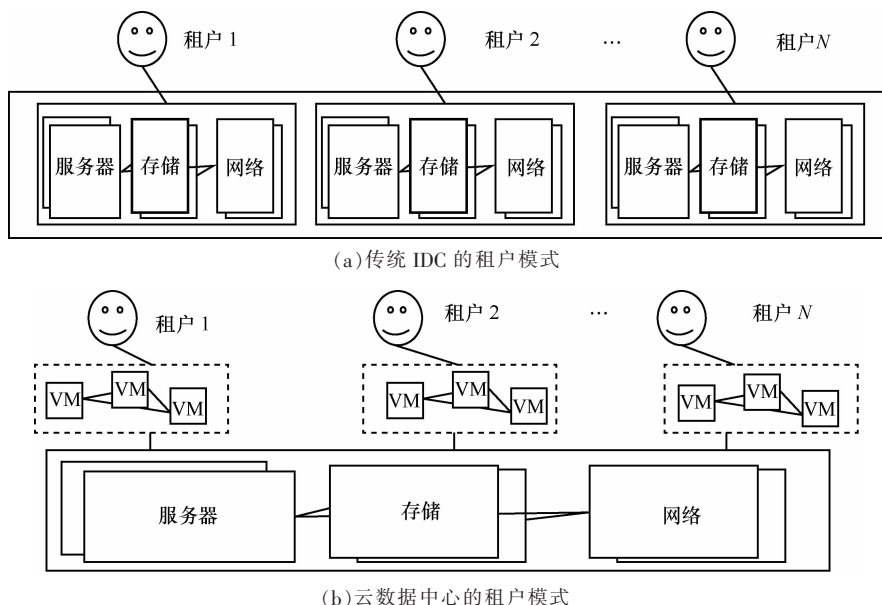


图 1 IDC 和云数据中心的多租户比较

户存在差别,IDC 的多租户偏向于物理环境的多租户共享,即机房/机架、制冷和出口网络的共享;而云数据中心的多租户则既包括物理基础设施,也包括对 IT 基础设施的共享,在用户看来租用的是一个独立的用户 IT 环境,即用户订购云数据中心的云计算服务后就可以将自己的应用和数据迁移或直接承载在自己租用的云数据中心基础设施上。

云数据中心的好处是能够按需快速地为客户端提供 IT 资源,满足客户的弹性 IT 资源需求,并且在一定程度上降低客户成本。由于应用了虚拟化技术,云数据中心的计算资源能够快速部署并弹性伸缩,但在网络资源部署方面,目前云数据中心采取的仍然是传统的网络架构,典型的云数据中心网络架构如图 2 所示,通过二层/三层网络架构连接计算集群,实现管理流量、业务流量以及存储流量的承载和交互。所有租户共享统一的网络架构实现应用之间或对外的通信,不同租户之间通常采用 VLAN 隔离,在资源池规模较小时,这个架构仍然可以应付,但一旦租户规模增长到一定程度,传统网络架构和技术就无法弹性满足要求,云数据中心的网络在多租户需求下面临诸多挑战,具体介绍如下。

- 传统 VLAN 技术只能提供 4 096 个隔离网络,对于大型的云数据中心来说显得捉襟见肘,需要寻找新的解决方案。
- 云数据中心的虚拟机(VM)规模巨大,由此带来交换机的 MAC 表项剧增,难以为继,IP 地址的分配和

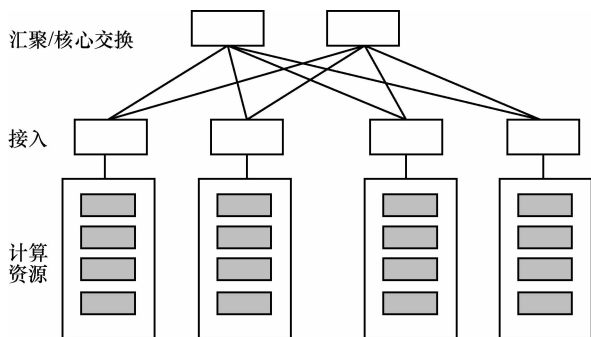


图 2 典型的云数据中心网络架构

管理困难重重。

- 所有租户的网络配置都需要由云数据中心提供商统一配置,配置复杂性非常高,容易出错,灵活性很差,周期也较长,难以满足客户灵活网络部署与调整的要求,同时对于企业客户来说,其资源池上的各类应用需要进行内外部的隔离和访问策略控制,目前的网络都无法灵活满足其需求。
- 虚拟化技术的一个重要优势是虚拟机可以实现迁移,这种迁移可以带来方便的维护、良好的负载均衡和高的资源利用率,但由于虚拟机迁移在很多情况下是动态完成的,面临地址管理以及网络策略迁移的问题。
- 对于多个云数据中心架构来说,面临着跨数据中心的统一网络拓扑管理问题、跨数据中心迁移带来的大二层网络建设问题、跨数据中心的流量优化和容灾备份问题。

总而言之,云数据中心因为采用虚拟化技术实现多租户对计算资源的共享和隔离,而出现不同于传统 IDC 的网络需求:一方面,虚拟机规模大幅增长、虚拟机动态迁移、计算弹性按需提供,带来了网络流量边缘化、地址管理、大二层网络以及动态弹性网络部署等挑战和需求;另一方面,多租户服务模式带来多租户网络隔离、自定义网络以及自动化部署等新的网络需求,能够实现网络与计算、存储资源的高效协同,所有资源都能够按需获取,即实现全面的 IaaS(将计算、存储、网络、安全整体基础设施环境作为服务提供给客户)。现有的网络技术和架构难以满足云数据中心的新需求,需要寻找新的网络解决方案。

在新的网络解决方案中,云数据中心应能为每个租户分配独立的逻辑网络,在逻辑网络中可以根据自身需求灵活配置网络安全、QoS 策略、自主网络地址分配、灵活内部组网和隔离以及快速部署网络服务等,而在现有物理网络上实现这些功能,将非常困难甚至无法完成,网络管理人员需要在不同网络设备上配置大量的信息,不仅容易出错,而且时间较长(有时甚至需要几周时间),无法像创建虚拟机那样快捷。因此,首先网络要引入“虚拟化”技术,能够为每个租户创建独立的“虚拟网络”,所有租户的“虚拟网络”共享同一底层物理网络;然后网络要“可定义”,即每个租户的“虚拟网络”可以根据租户需求自定义网络模板并自动化部署,这一方面要求租户虚拟网络中的网元能够按虚拟机部署和快速伸缩,另一方面要求能够通过集中的控制和管理单元进行统一的网络编排和快速配置。

2 SDN 技术

SDN 是时下网络行业最为热门的话题。SDN 起源于美国斯坦福大学的 Clean-State 课题,由 Clean-State 课题组提出 OpenFlow 协议,并基于 OpenFlow 协议的理念提出 SDN 概念。SDN 的核心理念是实现网络设备控制和数据转发功能的分离,如图 3 所示。2011 年,ONF(Open Network Forum)成

立,致力于推动 SDN 和 OpenFlow 技术的规范和发展。2012 年,Google 在 ONF 会议上发布了其基于 OpenFlow 的数据中心骨干网络流量工程项目,其链路利用率从 30% 提升到 90% 以上,Google 的加入使得 SDN 和 OpenFlow 的影响力大为提高,全球开始掀起一股 SDN 的研究热潮。

在 ONF 主导的基于 OpenFlow 的 SDN 快速发展的同时,网络界还有其他几股力量也在推动网络架构和技术的发展,包括 IETF 推动的 I2RS(interface to router system)架构、ETSI 推动的 NFV(network function virtualization)以及 Nicira 公司推动的针对云计算场景的基于 overlay 的网络虚拟化技术,它们分别代表不同的对网络进行变革的方向和理念,例如:IETF 的 I2RS 是保持现有的网络架构不变,开放网络设备控制平面功能,从而可以通过集中的控制端实现对网络的有效控制;NFV 则是在服务器虚拟化技术成熟和大规模应用的背景下,在电信运营商阵营推动下将网络功能软件化并基于虚拟化统一承载,从而实现网络功能的灵活低成本部署;而 overlay 网络虚拟化技术是针对虚拟化环境下多租户网络隔离和自动化部署提出的一种解决方案。4 种技术流派的不同实现架构如图 4 所示,它们的共同点是通过软件改变网络的部署和架构,在广义上都是软件定义网络(SDN)的范畴。

基于 OpenFlow 的 SDN 代表网络架构的一种变革方向,以互联网为主导力量(传统上互联网只是网络的大客户),代表互联网客户对网络的诉求,其影响力覆盖端到端的网络,将对传统网络架构和部署方式产生深远的影响,对传统网络的改造程度最大。目前各种力量都积极加入,但总体上产品还不成熟,实际部署应用案例比较少,另外 OpenFlow 本身只是定义了控制器(controller)的南向接口,并没有明确定义控制器之间的东西向接口以及北向接口,限制了 OpenFlow 架构的推广应用。

IETF I2RS 可以被视为网络界对 OpenFlow 迅速发展的一种应对方案,希望达到的目标与 OpenFlow 基本一致,即对网络设备控制功能的开放,也需要改造现有网络设备(升级设备控制软件模块,提供控制开放能力),受限于各个主流厂商的实现程度,仍然存在各个厂商不能兼容的风险。

ETSI NFV 也是一个长远的网络设备发展和演进的方向,其与 OpenFlow 和 I2RS 有本质差别,主要关注的是网络设备本身的实现和部署方式,需要传统网络厂商、新型软件厂商以及通用服务器芯片厂商的共同推动。目前各个芯片和网络厂商较为积极,但要实现大部分网络功能的虚

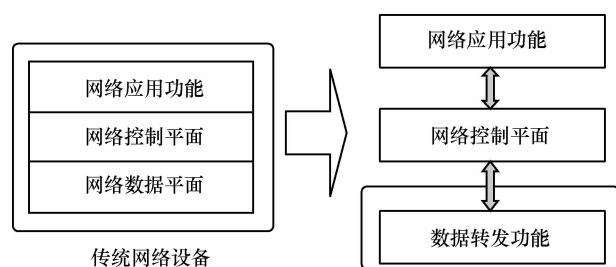
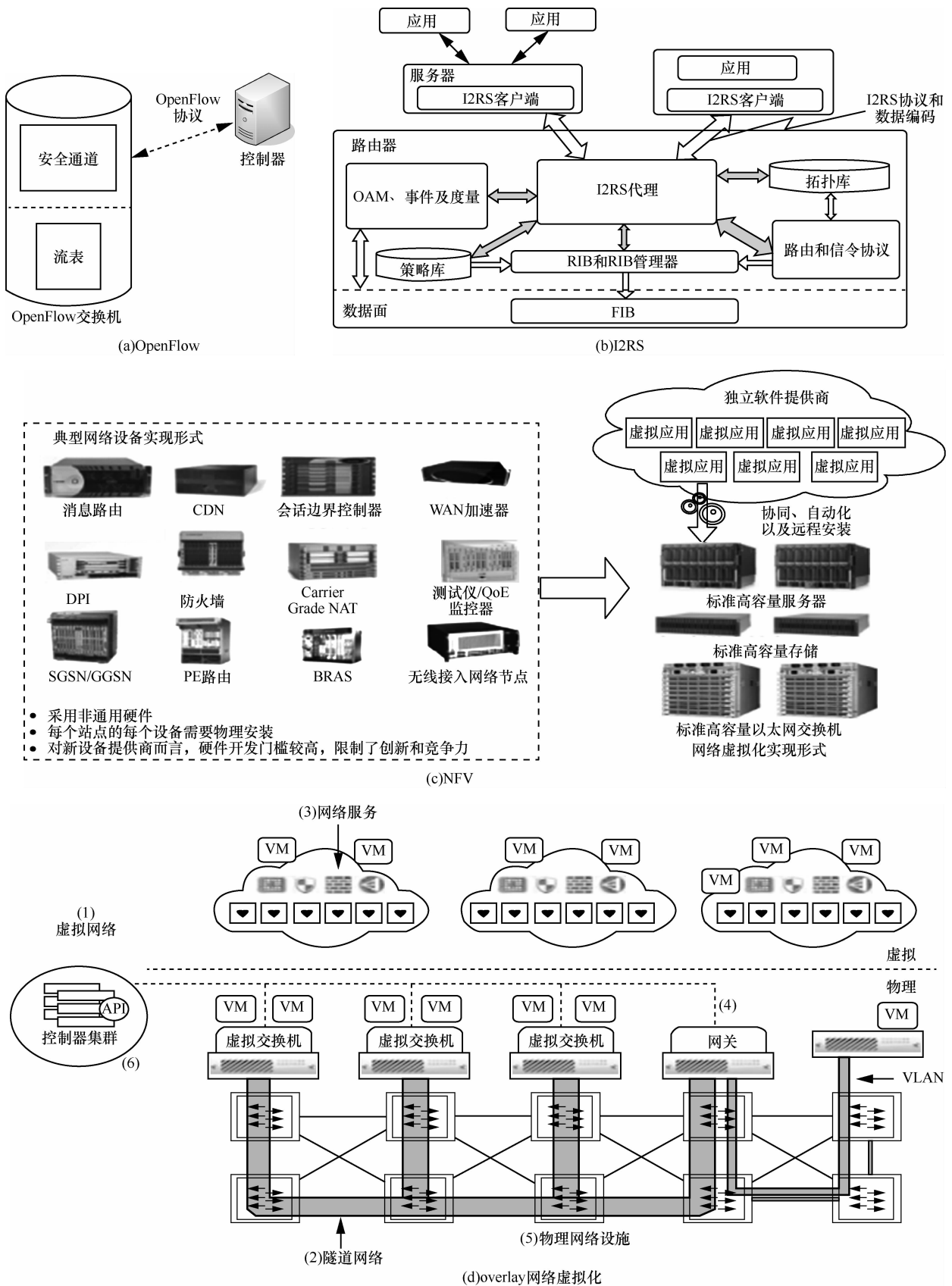


图 3 SDN 控制和转发解耦



拟化还需要一段比较漫长的时间,特别是核心的高性能交换机和路由器功能的实现。

overlay 网络虚拟化方案主要为云计算而生,结合 overlay 网络虚拟化技术,是 SDN 和 NFV 的一种混合软件解决方案,大部分解决方案不依赖于底层物理网络,因此最受欢迎,目前有较为成熟的商业产品,也有成功的部署案例,但存在多种厂商实现方式,与虚拟化技术关系紧密,传统虚拟化垄断厂商有可能在 overlay 上继续保持垄断地位,未来实现统一较为困难。

从技术成熟度和产业发展趋势看,I2RS 和 overlay 由于对现有网络的改造程度较低,将在未来 3 年内得到推广应用,其中 overlay 由于云计算需求强烈,商业化进展更快,而 I2RS 在 OpenFlow 时代真正到来之前,为了满足用户对开展网络新业务、高效网络管理以及 VIP 客户流量优化等的需求,会加快发展并且在局部领域获得应用,相对来说 OpenFlow 和 NFV 对现网整体影响很大,产品成熟和全面应用需要较长时间,但这之前将会首先在云数据中心、接入网、无线网等局部领域得到试点和应用。

虽然 OpenFlow(控制与转发分离)、I2RS(开放控制接口)以及 overlay 方案从技术上都可以解决网络隔离和快速配置问题,但从应用场景、部署难易程度、产品成熟度等

多方面看,overlay 网络虚拟化技术是目前最为成熟的可应用于解决云数据中心网络问题的方案。

3 基于 overlay SDN 的云数据中心网络

overlay SDN 方案的通用架构模型如图 5 所示,包括 4 个层次:物理网络层、租户网络层(虚拟网络层)、网络控制层以及网络编排层。物理网络层由接入交换机、汇聚交换机和核心交换机等网络设备组成,为租户网络提供透明的转发通道;租户网络层由叠加在物理网络之上的各个不同租户的“虚拟网络”组成;网络控制层负责网络配置、网络信息收集以及流表下发等功能,基于多种标准协议和接口(如 OpenFlow、NetConf、XMPP、OVS-DB 等)实现对租户网络的流量控制、安全策略设置、网络路由信息配置等;网络编排层是对网络功能和服务的抽象,形成网络服务链(service chain),同时能够根据网络监控信息自动调整网络策略和网络服务部署等,通过与云管理平台对接,实现租户虚拟网络的自动化部署。

overlay SDN 是一种混合解决方案,从技术原理上应用了网络虚拟化(network virtualization)、软件定义和网络功能虚拟化(NFV)技术。通过网络虚拟化技术实现对物理网络的虚拟叠加,可以灵活创建租户的隔离虚拟网络;基于

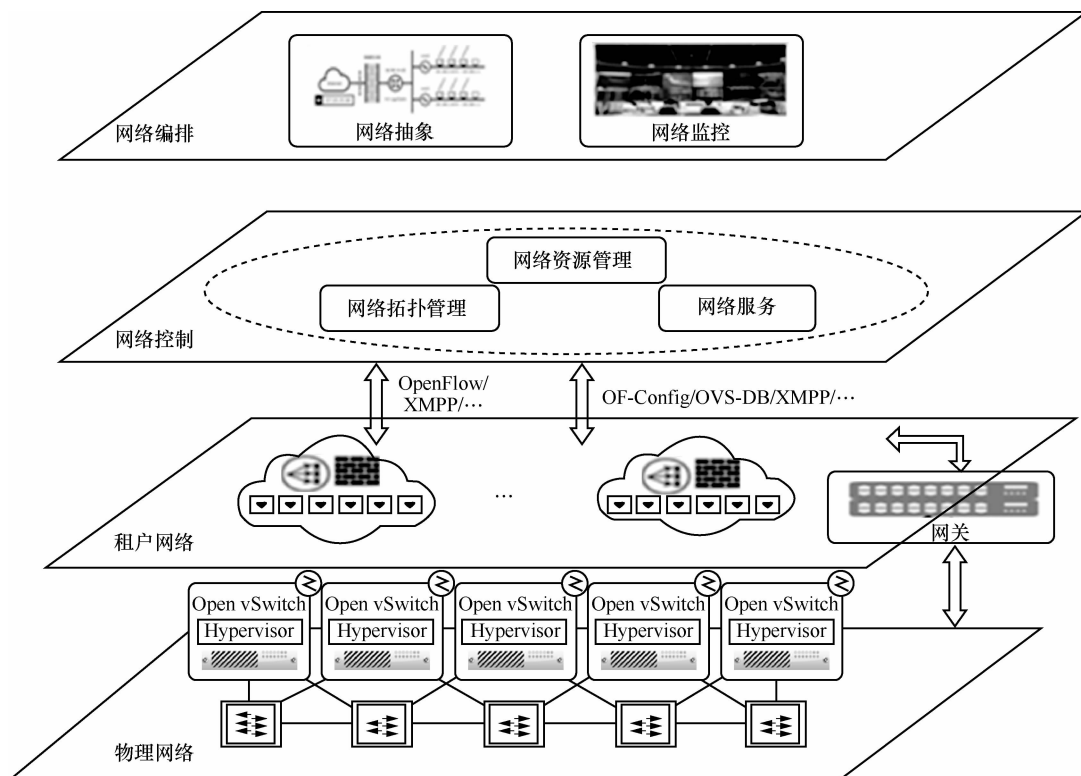


图 5 overlay SDN 架构模型



软件定义实现虚拟网络设备的转发和控制分离,实现多租户逻辑网络的统一控制;通过网络功能虚拟化技术实现网络服务功能的灵活部署。在云数据中心网络实现虚拟化、软件定义和网络功能虚拟化后,可通过更高层次的统一云管理平台(如 OpenStack/CloudStack)实现计算、存储、网络的协同和统一调度。

在一个典型的基于 overlay SDN 的云数据中心网络方案中,关键的组件包括以下 4 种。

- 虚拟交换机(vSwitch),实现基于物理网络的叠加网络技术,主要是二层叠加网络技术(如 VxLAN)。
- 实现物理网络和虚拟网络互通的网关(软件或硬件实现,主要功能包括实现虚拟网络和物理网络的互通、虚拟路由器、虚拟 DHCP、NAT、虚拟防火墙、虚拟负载均衡、虚拟 VPN 等功能),网关设备的成熟度是 overlay SDN 成熟度的关键指标。
- 实现东西向三层互通的分布式路由器以及东西向流量隔离的分布式防火墙,这是 overlay SDN 中非常关键的组件功能,可以避免流量的“发卡”效应,同时有效实现流量的安全隔离。
- 控制器以及网络管理器(也称为网络编排器),负责虚拟网络的配置和监控、网络编排和自动化部署等,与云管理平台对接,实现云管理平台对资源池

网络资源的管理。

典型的基于 overlay SDN 的云数据中心网络实现方案如图 6 所示。下面对该方案的几个关键概念和原理进行分析和说明。

(1)网络虚拟化

网络虚拟化的本质是在同一个物理网络之上实现多个虚拟叠加网络,如图 7 所示,在云数据中心主要是指在三层网络上叠加二层虚拟网络。网络虚拟化的技术方案主要包括 VxLAN(MAC over UDP)、STT(MAC over TCP)、NVGRE(MAC over GRE)以及 OpenFlow 等,其中 VxLAN 已经成为主流厂商支持和采用的成熟方案,本文主要介绍 VxLAN 实现。

VxLAN 是一种可扩展的虚拟化局域网协议,其目标是解决 VLAN 技术在部署大型云数据中心时遇到的可扩展性问题,最早由 VMware 和思科提出,目前得到包括华为、博通(Broadcom)、瞻博(Juniper)、思杰(Citrix)、红帽(Red Hat)、华三等主流网络和 IT 公司的支持。VxLAN 采用类似于 VLAN 的封装技术,MAC 以太网帧封装在三层网络分组(即 MAC-in-UDP)中,这种 MAC-in-UDP 封装技术为虚拟机提供了与底层网络和位置无关的二层抽象,VxLAN 的分组格式如图 8 所示,可以看出 VxLAN 协议的核心是为 MAC 分组提供一个虚拟隧道功能。

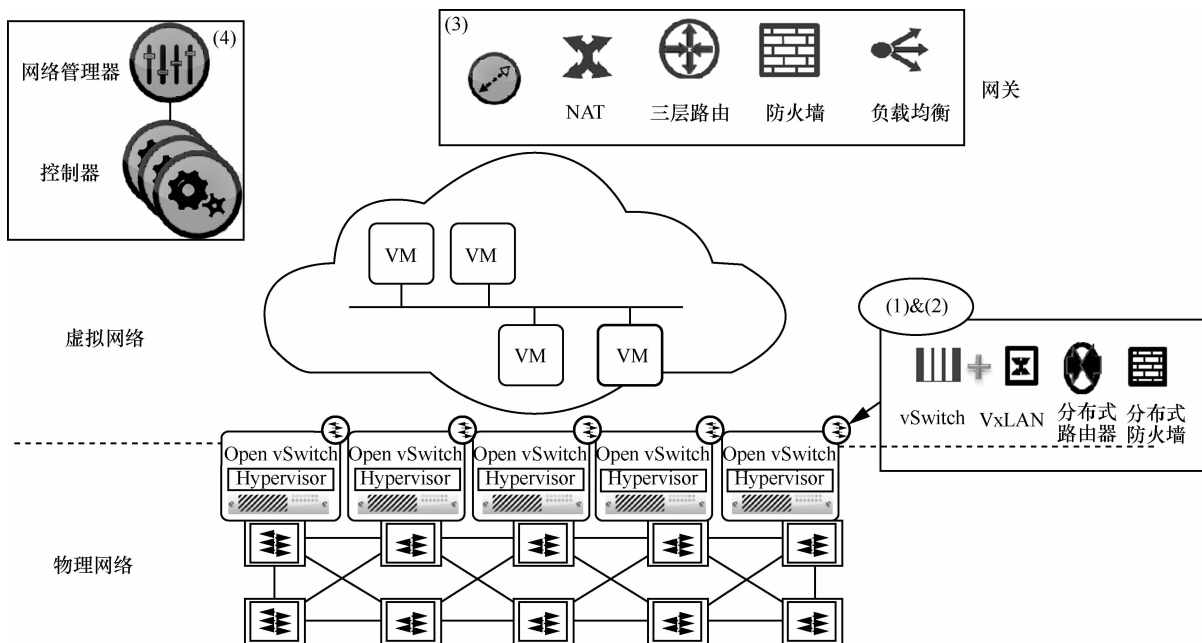


图 6 基于 overlay SDN 的云数据中心网络解决方案

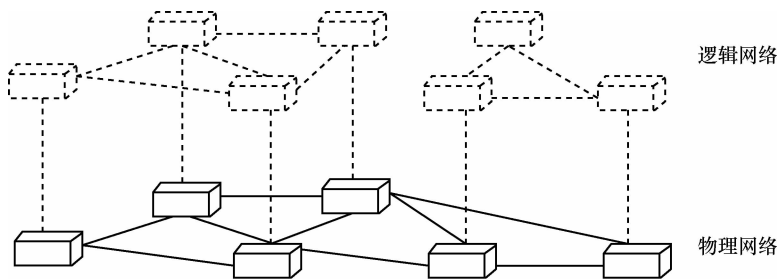


图 7 网络虚拟化概念

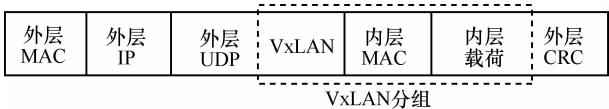


图 8 VxLAN 数据分组格式

前面提到,VLAN 受限于 12 bit 标识符,只有 4 096 个地址,而 VxLAN 的标识符是 24 bit,能够提供大约 1 600 万个 VxLAN 网络,几乎可以在可预见的未来满足任何二层网络隔离的需求,同时 VxLAN 是基于 IP 网络传送的,因此 VxLAN 可以跨越二层物理网络,实现跨网络边界的部署,可作为多个云数据中心的二层互通网络,实现跨数据中心的虚拟机二层互通和迁移。

在基于虚拟化技术的云数据中,VxLAN 的运行需要依赖于 VTEP(virtual tunnel end point,虚拟通道端点),VTEP 位于网络边缘,虚拟机通过 VTEP 接入物理交换机,VTEP 通常由虚拟交换机实现,如图 9 所示。源 VTEP 负责对来自 VM 的以太网帧进行 VxLAN 封装,并通过底层 IP 分组通道发送到目标 VTEP,这样在一组 VTEP 之间建立了 VxLAN 隧道,以承载不同租户(一组 VM)的流量,并可

以实现不同租户流量的隔离。虚拟交换机目前主要包括商业软件(如 VMware 的 vSwitch)和开源的 OVS(open virtual switch,开放虚拟交换机),虚拟交换机可由 Hypervisor 实现或以虚拟机形式运行在 Hypervisor 之上。

(2)网络功能虚拟化

针对每个租户的网络,可以在虚拟机/物理机上灵活部署基于软件实现的防火墙、负载均衡、DHCP、NAT、虚拟交换机、虚拟路由器等网络交换、路由和服务功能。以软件实现这些网络功能并可集约化承载在通用物理设备(或虚拟机)上,从而可以根据预先定义的模板实现快速自动化部署并且可以灵活伸缩。目前,这种实现方式存在性能不足的担忧,但由于这些虚拟网元主要服务于单个租户,并且处于网络边缘,因此从目前测试数据和部署经验看,并没有性能瓶颈问题。

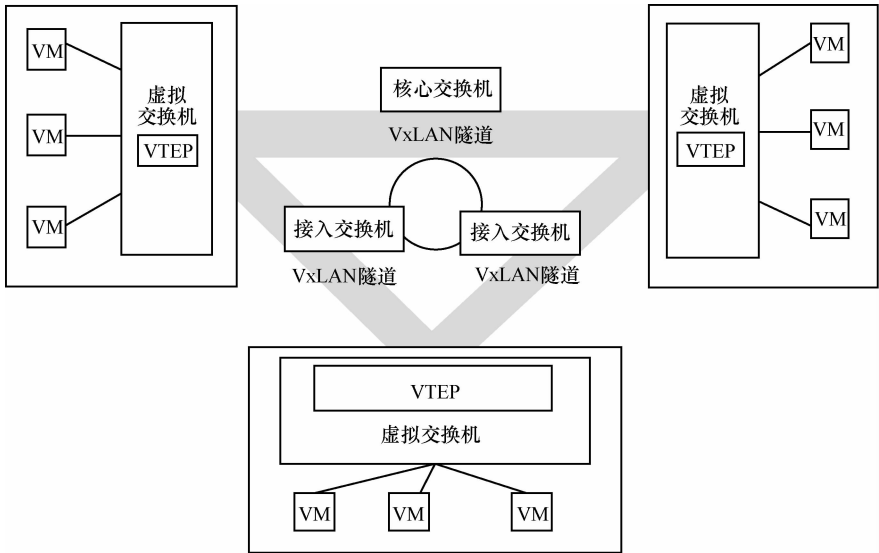


图 9 VxLAN 隧道



(3) 软件定义

当每个租户都从物理网络中虚拟自己的“租户网络”时,成千上万的租户虚拟网络很难通过手工完成配置和灵活部署,需要将网络的配置和管理授权给租户,为租户提供标准的策略模板以及网络定义模板来实现对网络的配置和创建,从而实现自动化和快速灵活的网络管理,在 overlay SDN 方案中通过引入控制器和网络管理器实现这一功能。如图 10 所示,控制器(一般是集群实现)通过特定的接口和协议实现对网络中各种网元(如虚拟交换机、虚拟路由器/分布式路由器、软硬件实现的网关、防火墙、负载均衡等服务网元)的管理和控制,如采用 OVS-DB(OVS 虚拟交换机配置协议)、OF-Config (OpenFlow 配置协议)、XMPP(可扩展消息和状态协议)等方式实现对纳管设备的管理和配置,采用 OpenFlow、XMPP 向纳管设备下发路由/转发信息。

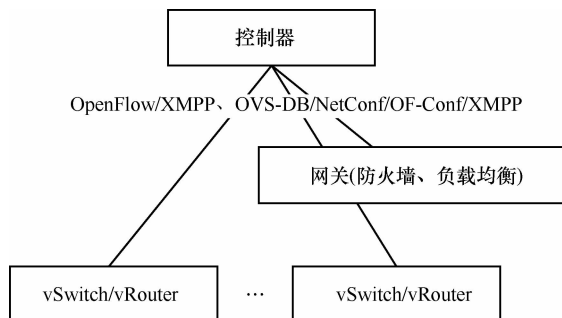


图 10 控制器与网络管理器

由于控制器的存在,虚拟网络的底层网元(vSwitch/vRouter/网关)可以只负责数据的转发,而不需要关心数据到底如何发送到目标设备,因为这些都由控制器提前配置到相应网元中。

(4) 其他网络功能

overlay SDN 还具备东西向流量扁平化(即东西向的流量不需要绕行三层交换机而直接通过分布式路由器在本地路由实现,减少路由跳数)和东西向流量隔离功能,每个租户具备独立的地址空间(可以在各自网络内配置使用相同的 IP 地址),同时可以实现灵活的 QoS 功能(包括网络流量限速、流量整形以及差异化服务质量等),能够为每个租户提供全面的网络功能以及非常高效的网络管理和配置工具。

(5) 跨云数据中心的方案

跨云数据中心网络以大二层网络互联为主要诉求,云

数据中心之间基于 SDN 部署的需求主要是流量工程,随着 SDN 技术的发展,未来可能直接引入 OpenFlow 以解决云数据中心之间网络的流量控制和优化问题。从 overlay SDN 方案本身看,由于 VxLAN 并没有网络边界限制,可以架构在多个云数据中心之上,提供跨云数据中心的多租户虚拟机组网。

目前 overlay SDN 方案已在若干国内外运营商云资源池和云数据中心进行部署验证,验证内容包括按租户自主配置、自动化/半自动化部署、多租户网络及隔离、较好的扩展性/性能/可靠性等,从初步验证的结果看,这种方案具备现网应用的可行性。但 overlay SDN 方案也存在一些问题,具体如下。

各个主流厂商(既有 VMware、Citrix 等虚拟化厂商,也有思科、Juniper、阿朗等网络厂商,还有 HP、IBM 等 IT 厂商)分别推出各自的解决方案,并且已经有较为成熟的产品,虽然各个厂商的解决方案总体架构差异较小,但具体实现上却有较大差异,例如虚拟交换机,有些厂商在 Hypervisor 里实现,有些只能通过虚拟机承载实现,显然前者性能更好,但却存在虚拟化技术捆绑的问题,即对于虚拟化软件垄断厂商来说,有可能继续垄断网络方案。另外,控制器与纳管设备的交互协议也差别较大,这就决定了每个厂商的 overlay 方案都是 turn key 方案,核心部件不具备替代性,同时各个厂商的控制器不能互通,上层云管理平台需要适配不同厂商的控制器平台。总之,目前的 overlay 方案都是厂商锁定的方案,后续有必要对 overlay 的方案进行解耦和,推动互通和规范化,以利于 overlay SDN 产业更为健康地发展和推广应用。

传统云数据中心网络由运维部门集中管理和配置,租户可以提出网络的需求,但没有专属于自己的网络,不需要自己配置管理网络,而基于 overlay SDN 的多租户网络架构的一大特色就是每个租户可以拥有自己的逻辑隔离网络,可以自行组网、部署和配置,具有很高的灵活性,网络交付速度大大提升,但带来的一个问题就是租户需要具备网络背景,对租户提出了较高的要求,使用门槛提高。因此,资源池运营方需要充分了解租户的公共需求,提供更抽象的预置网络模板供用户选择,虽然降低了灵活性但提升了易用性。

目前运营商和企业都有一些部署案例,但总体上试验性质的为多,原因是计算虚拟化部署应用已经有若干年,已形成一定的规模,有大量的存量用户,要将 SDN 这种以

软件实现为主的新技术应用到资源池风险较大,大部分客户都会比较谨慎,需要逐步扩大应用范围,这有可能是一个较长的周期。

4 结束语

云数据中心是一种多租户共享计算、存储和网络资源的数据中心架构。多租户的模式为云数据中心的网络架构带来诸多挑战,如无租户数量限制的网络隔离、快速的网络管理和配置、灵活的东西向路由和安全隔离方案以及全面的防火墙和负载均衡等 L4~L7 的网络服务,能够为每个租户提供按需弹性的网络资源。SDN 的提出和发展为云数据中心网络的部署提供了一种新的解决方案,本文首先简单介绍 SDN 的几种技术流派和各自的优缺点,基于成熟度和部署难易考虑,提出基于 overlay SDN 的云数据中心网络解决方案是当前的现实选择,对 overlay SDN 方案进行了详细的分析,同时也指出 overlay SDN 存在的主要问题。当然,云数据中心的网络将随着 SDN 的进一步发展和成熟,逐步演进到更为简单和标准的架构和部署模式,基于 OpenFlow 的 SDN 将可能成为未来云数据中心网络的主要部署模式。

参考文献

- 1 Thomas D N. 软件定义网络——SDN 和 OpenFlow 解析. 北京:人民邮电出版社, 2014

- 2 雷葆华. SDN 核心技术剖析和实战指南. 北京: 电子工业出版社, 2013
- 3 VMware_NSX 网络虚拟化设计指南. <http://www.vmware.com/cn>, 2013
- 4 <https://www.opennetworking.org/>

[作者简介]



饶少阳,男,博士,中国电信股份有限公司北京研究院高级工程师,主要研究方向为云计算与大数据。

陈运清,男,中国电信股份有限公司北京研究院教授级高级工程师、副院长,主要研究方向为高智能网络和下一代互联网。

冯明,男,中国电信集团公司技术部高级业务督导、教授级高级工程师,中国通信学会信息通信网络技术委员会委员,中国计算机学会网络部数据通信委员会委员,中国电信集团公司科学技术委员会数据网技术部成员,享受国务院政府特殊津贴,主要研究方向为云计算、物联网、大数据等。

(收稿日期:2014-06-30)

(上接第 22 页)

- 3 Ji P N. Software defined optical network. Proceedings of ICOCN, Chonburi, Thailand, 2012
- 4 张杰, 赵永利. 软件定义光网络技术与应用. 中兴通讯技术, 2013(3)

[作者简介]



纪越峰,男,博士,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授、执行院长,国家重点实验室常务副主任,国家杰出青年基金获得者,国家级教学名师,国家重点基础研究发展计划(“973”)IROF项目首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)AONI项目首席专家,主要研究方向为宽带网络与光波技术。先后获得国家科学技术进步奖、国家技术发明奖、国家级教学成果奖等多个奖项。



张杰,男,博士,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授、副院长,主要研究方向为光网络体系结构、控制管理和协议标准。已主持基金项目 6 项,获得 2 项国家技术发明奖;已出版著作 8 部,发表论文 300 余篇,其中被 SCI/EI 检索 200 余篇。



赵永利,男,博士,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院讲师,主要研究方向为智能宽带网和网络资源虚拟化等。已主持和参加基金项目 5 项,获得中国通信学会科学技术进步奖一等奖和教育部科学技术进步奖二等奖各 1 次;已出版学术专著 2 部,发表 SCI/EI 检索论文 150 余篇。

(收稿日期:2014-06-28)