

基于 SDN 的网络试验床综述

黄韬^{1,2}, 刘江^{1,2}, 张晨¹, 魏亮^{1,2}, 刘韵洁^{1,2}

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 江苏省未来网络创新研究院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 基于软件定义网络 (SDN, software defined networking) 技术构建网络试验床 (简称 SDN 试验床) 近年来引起了学术界和产业界的广泛关注, 并出现了很多具有参考价值的系统平台建设案例。因此, 针对全球范围内的 SDN 试验床进行综述研究, 首先探讨 SDN 试验床相比传统网络试验床的优势以及大规模 SDN 试验床的基本设计原则; 其次从项目目标与进展情况、关键技术、网络部署和特色应用 4 个方面对已有的 SDN 试验床项目进行深入分析; 最后从网络切片、光与无线兼合、安全性、可靠性 4 个方面介绍了该领域面临的挑战, 并提出了未来可行的研究方向。

关键词: 软件定义网络; 试验床; 网络虚拟化

中图分类号: TP302

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018092

Survey on SDN-based network testbeds

HUANG Tao^{1,2}, LIU Jiang^{1,2}, ZHANG Chen¹, WEI Liang^{1,2}, LIU Yunjie^{1,2}

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Jiangsu Future Networks Innovation Institute, Nanjing 211100, China

Abstract: The network testbed based on software defined networking (referred as SDN testbed) has attracted extensive attention in the academic and industrial circles in recent years, and there have been many valuable cases of system/platform construction. Therefore, an overview of the SDN testbed was intended to conduct in the global scope. Firstly, the advantages of the SDN testbed and the basic design principles of the large-scale SDN testbed was explored comparing with the traditional network testbed. Secondly, in-depth analysis of existing SDN testbed projects was provided from the aspects of the project objectives and progress, the key technologies, network deployment, and featured applications. Finally, the challenges faced in this field were described in terms of network slicing, light and wireless convergence, security, and reliability. Future research directions are also suggested.

Key words: software defined networking, testbed, network virtualization

1 引言

近年来, SDN 得到了学术界和工业界的瞩目。

SDN 的基本理念是将控制平面与转发平面分离, 赋予网络可编程的能力。SDN 的控制器也被称为网络操作系统 (NOS, network operating system), 承载了

收稿日期: 2017-06-19; 修回日期: 2018-04-24

通信作者: 刘江, liujiang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2015AA016101); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (No.2012CB315801-1)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2015AA016101), The National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2012CB315801-1)

从底层物理设备中剥离出来的控制功能，能够在远端集中地对网络进行控制与管理。SDN 的特征使新型网络业务能够得到敏捷部署，新的网络管控功能、策略也能够在不依赖设备厂商的情况下迅速得到实现。OpenFlow 协议^[1]是目前用于控制器与网络设备之间的标准化控制的主流协议之一。

研究者常使用仿真 (simulation)、模拟 (emulation) 平台或试验床 (testbed) 来评估新的网络设计、算法的性能。由于试验床中往往承载着更多真实的网络流量和网络设备，因此，相比于 simulation 和 emulation 平台，使用试验床进行的网络创新试验更有说服力。为了支持 SDN 及其他网络技术的研究，许多大规模试验床开始使用 SDN 虚拟化技术进行搭建。其核心思路是在统一的物理基础设施上，利用网络切片技术^[2-4]透明地向不同试验者提供相互隔离的网络资源。同时，结合 OpenStack 等云管理平台，网络研究者可以根据自己的实际需求向试验床动态申请虚拟化的网络切片资源。此外，试验床的控制框架可以支持管理者集中管理大多数设备和试验项目。

许多国家都在基于 SDN 技术构建大规模网络试验床，其中大部分都是基于 OpenFlow 协议搭建的，这些 SDN 试验床吸引了许多研究者在其上部署自己的网络业务，或验证网络本身的一些创新性试验。通过全球科研者的努力，SDN 试验床对未来网络体系架构和关键技术的创新做出了积极的贡献。

本文将对 SDN 试验床的设计进行概述，并从设计目标、关键技术、网络部署和特色应用 4 个方面详细介绍一些大规模 SDN 试验床的具体实现，包括 GENI OpenFlow 项目^[5]、OFELIA^[6]、RISE^[7]、韩国的 OF@TEIN^[8]以及作者在 SDN 网络创新试验平台方面的尝试。此外，本文还将讨论大规模 SDN 试验床中所面临的挑战。

2 SDN 试验床概述

本节将从 3 个角度对 SDN 试验床进行概述，分别是 SDN 试验床相比传统网络试验床的优势、大规模 SDN 试验床的设计原则以及大规模 SDN 试验床的关键技术。

2.1 SDN 试验床相比传统网络试验床的优势

传统的网络试验床通常缺少自动化能力和灵活性，而 SDN 提供了一个能改变传统网络试验床

工作方式的技术路线。采用 SDN 系统架构，特别是利用 OpenFlow 协议来搭建网络试验床，能有效解决传统试验床灵活性差和无法自动化部署的问题，为新型协议和业务等试验提供便捷性。SDN 带来的优势主要在于以下 4 个方面。

1) 易部署

在非 SDN 试验床中，试验床的搭建需要管理者手动配置繁多的网络设备，这一过程烦琐、耗时，且容易发生配置方面的错误。SDN 向管理者提供了可编程的接口，使试验的搭建过程变得更加简单，SDN 试验床能自动化地完成试验环境的部署。

2) 控制优化

传统的网络设备采取分布式的流量转发逻辑，缺少全局的网络视图，导致转发策略无法达到全局最优。SDN 分离了网络设备中的控制逻辑和转发逻辑，集中式的 SDN 控制器拥有全局的网络视图，因此，SDN 应用能够通过全局信息制订策略来提高网络资源的利用率。

3) 更灵活的网络虚拟化

网络虚拟化技术是网络试验床中的核心技术。传统的网络试验床通常采取分布式配置的方式来实现虚拟化。基于 SDN 的虚拟平台能降低虚拟化的复杂性并避免操作错误，还能通过先进的自动化算法来提高试验床中网络虚拟化的灵活性、可用性和资源利用率。

4) 新型协议和业务试验便捷化

对新型协议和业务的试验是试验床的一个重要指标。传统的网络试验床常常受已部署的物理网络设备的硬件限制，只能支持 OSI 中某几层的试验。而 SDN 将网络各层的特征抽取出来，在流表的匹配域中进行识别，根据试验者的需求，可以更加便捷地支持网络各层新型协议和业务的试验。

2.2 大规模 SDN 试验床的设计原则

当 SDN 试验床规模变大时，则需要考虑更多理论与实践的因素，其中比较重要的包含以下 4 条设计原则。

1) 自动化

在传统的试验床中进行试验需要许多人工配置，这一过程十分复杂且会随着网络规模扩大增加出错的可能性。SDN 开放了网络的可编程能力，同时，计算机虚拟化技术能够提供虚拟机接口的编排和部署能力。通过结合上述 2 种技术，SDN 试验床能提供完全自动化配置的网络试验环境。

2) 灵活性

能够支持试验环境的变化是网络研究的重要需求之一，例如，当研究一种新的防环算法的性能时，研究者需要在不同规模的网络环境中进行试验对比。因此 SDN 试验床应该提供足够的灵活性，让研究者能够按需改变试验环境中网络设备的数量以及调整设备间的链路带宽。

3) 可扩展性

相较于传统网络，SDN 集中控制的特点给其带来了许多优点，但同时也带来了可扩展性的问题。特别是当 SDN 试验床在国家级或跨国范围内进行部署时，可扩展性会成为一个重要的影响因素。因此，需要在架构设计时充分地考虑集中控制与分布（甚至异构）部署的权衡关系。

4) 安全性

安全在所有 IT 架构中都是至关重要的。对于 SDN 试验床来说，不同的网络试验共享相同的物理基础设施，安全性的保障主要涉及了认证、授权、计费（AAA, authentication authorization accounting）的安全管理和切片技术中的流量隔离技术。

综合以上设计要素，SDN 试验床可以被认为是“为网络研究者设计的云网一体化平台”，为进行网络研究的租户提供了计算、存储以及网络资源，这些资源的集合通常被称为“切片”。

2.3 大规模 SDN 试验床的关键技术

部署大规模 SDN 试验床包含了多项关键技术，本文计划首先重点研究管理技术、组网技术与切片技术这 3 项关键技术，因为它们是实现完成试验床设计目标的核心关键和基础。

1) 管理技术

本文所阐述的管理技术不局限于 SDN 的管理（如 OF-CONFIG 和 OVSDB 协议等），还包含了虚拟机资源管理以及试验的运行状态管理。这些管理技术的集合构成了试验床的“控制框架”。

在控制框架下，用户通过前端网页与试验床资源进行交互，在前端上提交资源申请，描述试验所需拓扑与设备参数，控制框架会操作底层物理资源，例如虚拟机和网络设备等，分配给对应的虚网切片。虚拟机的控制依赖于服务器虚拟化技术^[9-10]，网络设备的控制依赖于网络虚拟化技术，协同管理技术通过调用这 2 项技术的 API 来创建和管理虚网切片。当用户申请的试验切片被激活后，相关的数据会被收集和分析。当试验结束后，相关的切片资

源将被重新释放。

管理技术将支撑整个试验生命周期。除此之外，还会涉及与安全相关的 AAA 机制、与跨区域扩展性相关的互联机制。

2) 组网技术

数据平面的组网技术解决了如何在物理和逻辑上连接 SDN 交换机的问题。在一个纯 SDN 域内，交换机能够通过铜线或光纤直接相连。而在数据层需要跨越传统网络时，交换机则需要通过标签技术（如 MPLS^[11]）或隧道技术（如 GRE^[12]）连接。

管理/控制平面的组网技术解决了如何连接管理/控制网元的问题。管理模块包括实现管理功能的软件，控制模块包括虚拟化平台以及试验用户所用的 SDN 控制器。管理/控制平面组网技术主要关心连通问题，通常 3 层的 IP 可达性就可以满足要求。

3) 切片技术

SDN 试验床中网络虚拟化平台使用切片技术来隔离不同试验的流量。由于 SDN 采用了集中式架构，因此，虚拟化功能通常以应用的形式被集成在 SDN 控制平台中^[13-14]。在许多数据中心中，网络虚拟化功能负责管理全网的转发逻辑虚拟化，保证网络连通基础上不同虚网流量间的隔离，数据中心的用户不需要知道网络底层数据分组转发的细节。然而，在 SDN 试验床中，虚拟化的场景需求与数据中心虚拟化有所不同，即为了进行网络本身的创新，试验床的用户往往需要控制试验网中的数据分组转发机制，而不仅仅是在试验网上运行业务应用，因此，他们需要拥有自己的 SDN 控制器和网络控制逻辑。因此，SDN 试验床的切片技术需要协同不同用户的控制器以保证虚网间的流量隔离，并使每个用户控制器都察觉不到其他虚网切片及控制器的存在。

为了实现以上目标，SDN 试验床的虚拟化平台也可以在通用 SDN 控制器平台外部独立实现^[15-19]。一种典型的方案是基于 OpenFlow 协议实现，以代理的形式位于 OpenFlow 交换机和用户控制器之间，通过修改 OpenFlow 消息和利用数据分组中的用户标签对控制信令（如 PacketIn、FlowMod 等）进行分流，并隔离数据平面上不同试验切片的流量。

3 国内外 SDN 试验床介绍

当前，全球已经有多个建设运行的 SDN 试验

床, 本文将介绍 5 个典型的大规模 SDN 试验床, 每个试验床都将从 4 个方面进行详细介绍: 试验床的设计目标与项目进展情况、试验床的关键技术、试验床的网络部署情况、试验床的特色应用。

3.1 GENI OpenFlow 试验床

3.1.1 设计目标与项目进展

GENI 由美国国家自然科学基金 (NSF) 赞助, 通过使用网络虚拟化技术来进行大规模的网络创新性试验, 后期由于 OpenFlow 等 SDN 技术的提出, GENI 重点关注了基于 OpenFlow 的试验床。GENI 采用螺旋上升的发展方式, 在最初 2 个阶段, 构建了点到点的发展模型, 并且向可进行连续试验的方向演进。在第 3 个阶段, GENI 引进了 OpenFlow 技术, 并且将 OpenFlow 交换机部署到校园网络试验环境中。目前, GENI 已经处于第 6 个阶段。现阶段主要目标为以下几点。1) 以更好的工具和服务吸引更多的试验; 2) 通过部署更多的 GENI 服务器机架吸引更多学校对 GENI 进行支持, 从而增大 GENI 的规模; 3) 完善 GENI 的测量与监测工具。

目前, OpenFlow 已经成为 GENI 重点支持的技术之一。通过 OpenFlow 技术可以给用户提供大规模网络试验的真实环境, 这其中包括 GENI 的切片和可编程性的核心概念。通过 GENI 中 OpenFlow 交换机提供的可编程特性, 网络管理者可以自行定义网络转发的规则。另外, GENI OpenFlow 是开放的, 用户可以通过门户网站申请自己的试验切片。

3.1.2 关键技术

1) 管理技术

GENI 试验网管理的核心是被称为控制框架的 GCF (GENI control framework), GCF 包含 4 个部分: GMOC、Clearinghouse、Research Tools 和 Aggregates, 其关系如图 1 所示。

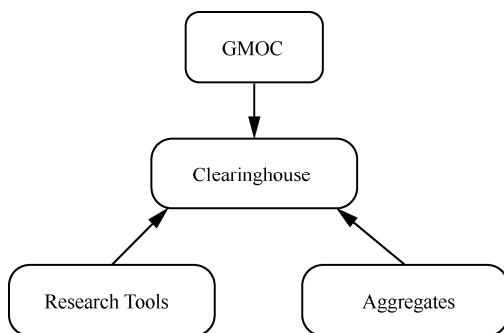


图 1 GCF 组件示意

Aggregates 用于给试验者提供资源, 不同的 Aggregates 提供不同类型的资源, 如计算资源、网络资源等。

Research Tools 主要用于试验者对 GENI 资源的管理和控制。例如, 资源预留工具用于绘制试验拓扑以及管理切片, 测量工具用于测量统计数据, 而监测工具可以监测资源的使用情况。

GMOC 目前有 2 个功能: 一个是对 GENI 基础设施的健康情况进行维护; 另一个是作为 GENI 用户操作试验切片的入口。

Clearinghouse 将试验切片、GENI Aggregates 和 GMOC 联合起来, 同时提供认证和授权服务。

GENI 控制框架定义了一系列的互联接口, 其中 Clearinghouse API 是 Clearinghouse 与 Tools/Aggregates 之间的接口。GENI Aggregates Manager API 明确了 Tools 和 Aggregates 之间的接口, 使 GENI Aggregates 可以为切片分配资源。GENI AM API 是 SFA (slice federation architecture) 的接口, 用来将不同试验床的资源编排为一个切片, SFA 已经应用于 PlanetLab、ProtoGENI、ExoGENI、InstaGENI 和 GENI OpenFlow 等多个项目中。

2) 组网技术

GENI 根据试验者的需求和现有的网络资源来提供多种组网操作。GENI OpenFlow 试验床由控制平面和数据平面组成。控制平面主要负责对数据平面中运行的试验进行配置和控制。用户可以通过 Internet 或隧道进行 SSH 连接, 以接入自己的试验切片, 控制平面上承载的是控制和监测数据的管理流量。

数据平面上同时运行着多个试验切片。GENI 试验床数据平面的组网技术主要包括以下几种。

① 全局 VLAN。这是一种最直接的方式。经过协商, 所有的网络都拥有全局唯一的 VLAN ID。

② VLAN 转译。当不同网络使用互相重叠的 VLAN 方案时, VLAN 转译可以解决它们之间的冲突问题, 使不同 VLAN ID 的网络可以加入同一个试验中, 且试验中的 VLAN ID 在每个网络的边缘进行转译。

③ L2 隧道。在经过运营商网络时, GENI 通常使用 Q-in-Q 方法建立隧道, 某些情况下也会使用 MPLS 技术。

④ 光纤连接。该方法可以为数据平面提供更高的吞吐量。因此, GENI 在很多场景下直接使用光纤来连通校园网, 并在骨干部分借助了 Internet2

和 NLR 的光纤网络。

3) 切片技术

传统网络使用VLAN来实现基本的策略虚拟化,但是在GENI中,为了能够提供更加灵活的虚拟化方案,GENI使用了基于OpenFlow的网络虚拟化平台。网络虚拟化平台是控制器和交换机间的透明代理,允许多个用户的控制器管理同一台物理OpenFlow交换机。下面是GENI使用的典型方案。

① FlowVisor

FlowVisor是一款支持切片技术的软件平台。在这个平台上,不同的试验者都可以从底层网络基础设施中获得他们自己独立的切片,并且用他们自己的SDN控制器对切片进行控制。最初从斯坦福大学发展起来的FlowVisor现在已经广泛应用在了试验网络中。

图2显示了FlowVisor的实现框架。通过XML-RPC模块,FlowVisor可以向用户提供Web服务。Poll Loop模块定期监听FlowVisor事件。FVClassifier模块维持与物理OpenFlow交换设备的连接、处理I/O请求和记录OpenFlow交换机端口、性能方面的信息。每一个FVClassifier模块对应一个OpenFlow交换设备。OFSwitchAccessor模块帮助FVClassifier模块接入物理交换机并和FlowVisor相连,然后将来自交换机的OpenFlow消息分发到正确的切片中。FVSlicer模块维持与控制器的连接,并管理OpenFlow会话和处理控制器发出的信号。Flowspace数据库使用OpenFlow 12元组存储来自不同切片的匹配信息。当来自一个物理OpenFlow交换设备的流到达Flowspace数据库时,OpenFlow消息会先根据切片规则被送到FVSlicer模块,然后再送至对应的控制器。

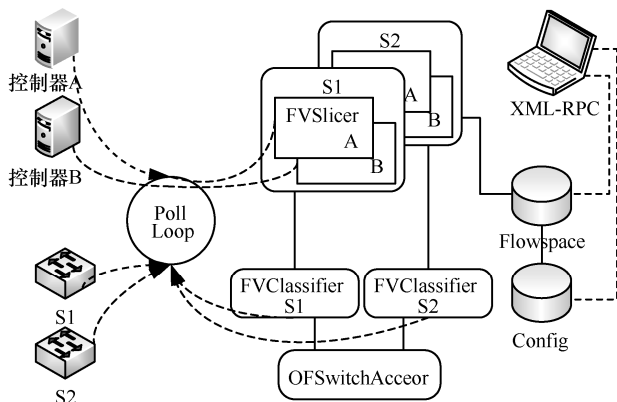


图2 FlowVisor实现框架

FlowVisor的核心规则是将上行消息映射给不同用户的控制器,并过滤下行消息,从而正确地转发流量,并保证不同切片流量的隔离。利用FlowVisor,各个切片可以共同使用OpenFlow硬件资源,这些资源主要包括网络拓扑、链路带宽、设备CPU以及转发表。FlowVisor对切片使用的策略语言进行了规定,通过FlowVisor,每一个切片都可以控制一系列的流,构成流空间Flowspace,并且每一个切片使用它自己的控制器对其试验网络进行管理。

然而,FlowVisor存在一些架构机制上的缺陷。例如,不同试验切片的流空间不允许重叠,这将导致试验切片地址空间不能按需分配。另外,FlowVisor只能为用户提供规模有限的拓扑,该拓扑只能是物理拓扑的一个子集。

② OpenVirteX

OpenVirteX(OVX)由ON.Lab开发,可以将一个物理SDN基础设备虚拟化成多个SDN虚拟子设备。其核心是一个网络嵌入模块,用户可以基于该模块利用OVX定制试验网络拓扑,并部署控制器,如图3所示。首先,嵌入模块从用户侧收到虚拟试验网络的信息,如拓扑和地址;然后,网络嵌入模块将生成一张虚拟网映射到实际设备的映射表,并将它发送给OVX;接下来,OVX记录映射信息,并且在物理基础设施之上实例化试验网络切片。当用户想要变更网络时,OVX也支持在不中断试验流量的情况下更改试验切片拓扑。

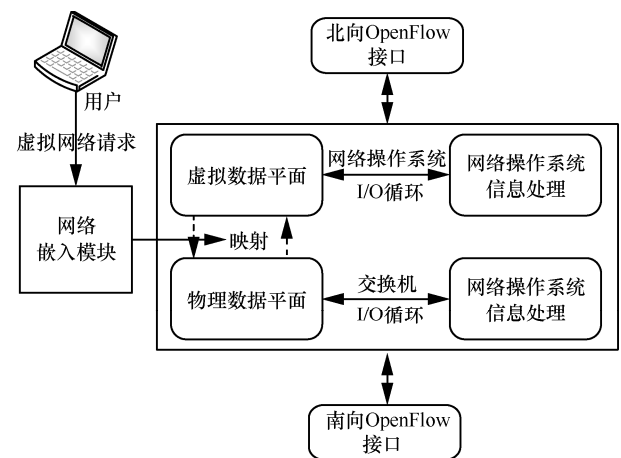


图3 OpenVirteX架构

与FlowVisor相比,OVX根据接入点信息(例如DPID和端口ID)对切片主机进行辨识,并给每一个切片分配一个独立的租户ID。这种方法虽欠

缺灵活性，但相比Flowspace的方法更具有实际意义。OVX在入口交换机重写数据分组的MAC地址来携带租户ID，并且在出口交换机中将MAC地址写回，因此OVX可以给每一个用户提供完整的地址空间，供用户使用。如果用户的控制器也需要修改MAC地址，那么OVX会将新的MAC地址记录下来，并据此在出口交换机将新的MAC地址写回。除此之外，OVX还允许租户任意配置拓扑，而不受物理拓扑限制。

3.1.3 网络部署

本节将从校园网和骨干网2个方面介绍GENI OpenFlow的网络部署，通过协调多个校园网和骨干网资源，研究者可以实施大规模的网络试验。

1) 校园网络部署

OpenFlow网络最先部署在高校的校园网络中，包括普林斯顿大学、斯坦福大学、克莱姆森大学和佐治亚理工学院等。园区级的OpenFlow网络大多进行了混合部署，包括生产网络、试验网络和测试网络，这些网络都是基于FlowVisor来实现隔离的。

2) 骨干网络部署

GENI OpenFlow网络的核心部分由Internet2和NLR网络中互联的OpenFlow交换机组成。图4展示了GENI OpenFlow骨干网的部署情况^[20]：GENI与NLR网络通过HP6600交换机和NetFPGA交换机进行连接，与Internet2的连接也是通过OpenFlow交换

机实现的。

目前，有3个骨干互联VLAN（3715、3716和3717）运行在核心网中的5台交换机上。这5台交换机分别位于图4所示的5个城市中。VLAN3715和3716在拓扑上呈现一个截断环型分布，从而预防突发环路的出现，VLAN3717为环型拓扑。每个截断环型VLAN的截断处都位于2个不同的链路之间。这3个VLAN在核心网中不是互联的，因此，它们的范围不应该超越骨干网进入校园网络。

3.1.4 特色应用

在 GENI 上进行了多项未来网络体系架构试验，如 MobilityFirst 的原型设计试验。MobilityFirst 架构不需要任何特殊的网关或代理，就可以提供对移动设备的完全支持和各种服务，包括对无线链路断开重连的稳定支持。GEC12 会议上展示了 MobilityFirst 架构的概念验证原型，GEC15 会议上展示了 MobilityFirst 在 OpenFlow 交换机上实现相应的功能。

3.2 OFELIA

3.2.1 设计目标与项目进展

欧盟 FP7 项目组在 2010 年秋季开始部署 OFELIA，其主要的设计目标是建立一个多层次、多区域、分布式的未来网络试验床，以同时容纳生产型流量和试验型流量。OFELIA 部署的第一周期分为了 3 个阶段，第 1 阶段完成了底层基础设施部署，包括 OpenFlow 交换机和虚拟化服务器；第 2

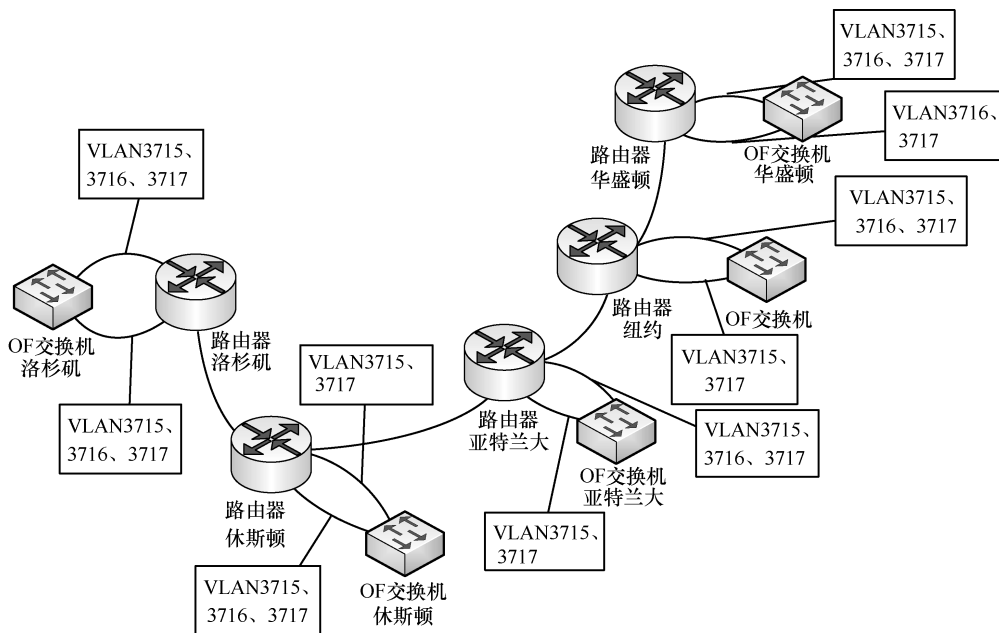


图 4 GENI 骨干网部署情况

阶段完成了不同区域的连接，并将 SDN 试验扩展到了无线和光通信领域；第 3 阶段完成控制框架开发，提供了与外部 Internet 设施和其他试验床的互操作能力。OFELIA 目前不再对外开放，只对 FP7 内部成员开放。

3.2.2 关键技术

1) 管理技术

为了支持虚网用户能对底层物理设施进行管理，并允许用户接入自己的试验，OFELIA 开发了自己的控制框架^[21]OCF (OFELIA control framework)。OCF 主要负责资源分配、试验床的自动化管理，以及试验切片的生命周期管理。图 5 为 OCF 的设计框架，支持通过基于切片的联合架构 SFA 与其他试验床联合，整个架构分为门户、Clearinghouse 以及资源管理层 3 层。

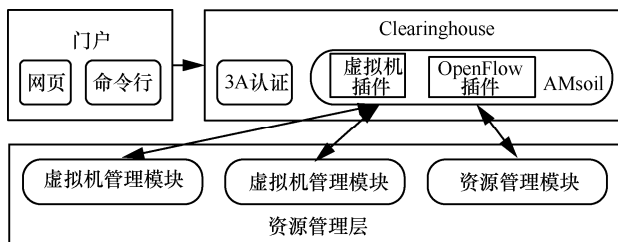


图 5 OCF 设计框架

OCF 的门户负责向用户提供管理切片的相关操作，方便管理员对系统进行管理。Clearinghouse 负责同步用户在不同区域内的试验账户信息，通过部署轻量级 LDAP 服务器来提供统一的认证服务。Clearinghouse 的功能可以在 AMsoil 中以开发插件的形式进行扩展，其中，AMsoil 是一个轻量级的可部署插件的框架，用于创建和管理试验床的资源。

资源管理层中最基本的模块是虚拟机管理模块和 OpenFlow 管理模块。虚拟机管理模块 AM (aggregate manager) 将资源管理模块的接口绑定在 Clearinghouse 层上，并负责为试验切片分配虚拟机。OpenFlow 管理模块是一个基于 Opt-in 管理器^[22]的 OpenFlow 工具，负责试验网络切片规则的管理和配置。

2) 组网技术

为了更为可靠地管控整个试验网络，OFELIA 还设计了 2 个带外网络用于控制与管理。目前，所有 OFELIA 平台的各个区域以 hub-spoke 拓扑连接。OFELIA hub 位于比利时，用来中继不同区域的试

验流量和控制流量。

OFELIA 数据平面跨越所有的 OFELIA 区域，试验流量可以跨越欧洲不同的国家和地区，各个网络区域通过比利时 iMinds 的 OFELIA hub^[6]来连接。如图 6 所示，OFELIA 中运行了超过 25 个来自不同供应商的 OpenFlow 交换机。试验网中的服务器通常与多个交换机相连，为网络试验的部署提供了一个稳定的环境。数据平面通过 GEANT 骨干网^[23]的 1 Gbit/s 二层专用线路连接，利用 OpenvSwitch^[24]在公共网络上搭建的 L2 隧道作为冗余线路。在管理网和试验网中，专用线路和隧道以网格状拓扑部署，同时起到了冗余容错的作用。

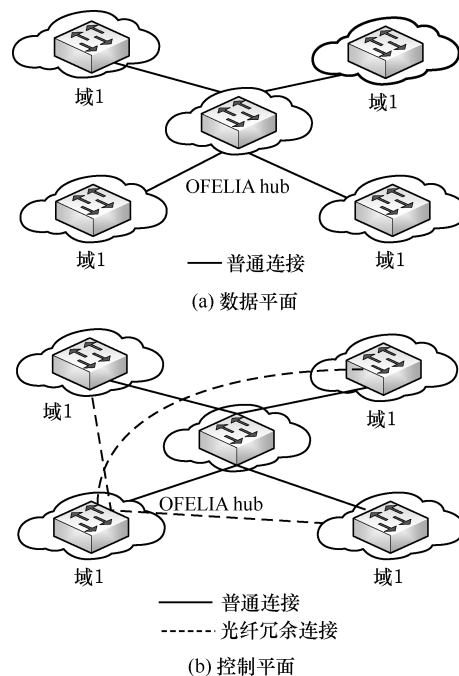


图 6 OFELIA 数据平面和控制平面组网示意

OFELIA 中不同区域的控制网络为每个区域分配了私有的 IP 网段，控制网络使用 OSPF 协议根据私有地址进行路由。所有区域的控制网络都连接到 OFELIA hub，其中部分网络作为冗余备份以保证控制网络稳定运行。这些连接由 GEANT 的专用线路或基于 Internet 的 L3 隧道实现。每个区域都提供了一些自动化的服务，如 LDAP 和 DNS。OFELIA 向用户提供了控制网络的远程接入服务，可通过远程 VPN 连接到试验切片。

OFELIA 管理网络用于监控和管理各个项目以及切片资源。实际上，管理网络并不是必需的，有些区域可以直接使用控制网络来实现这些管

理功能。

3) 切片技术

OFELIA曾使用FlowVisor来划分切片，然而FlowVisor存在许多局限性，因此，OFELIA项目的研究人员开发了VeRTIGO来改善FlowVisor的缺陷。图7描述了VeRTIGO的架构以及VeRTIGO各模块间的交互。其中，Web UI接受用户试验网络切片请求，VT Planner执行高效的算法^[25]，将虚网请求映射到实际物理资源。Storage是用户记录映射策略和流统计数据数据库。当切片申请被接受后，以下4个模块对OpenFlow通道进行虚拟化：Classifier根据流的分组头信息对异步的OpenFlow消息（如PacketIn）进行分类，Node Virtualizer根据用户的需求实例化逻辑交换机，实现物理交换机到逻辑交换机间的switch ID的转换，Port Mapper实现物理交换机到逻辑交换机间的Port ID的转换，Internal Controller负责下发流表项。

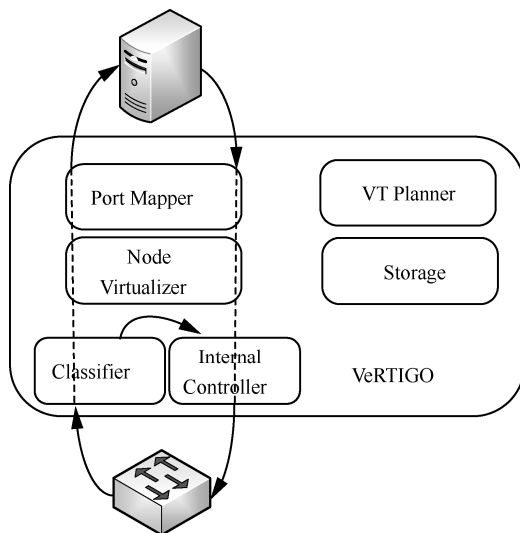


图 7 VeRTIGO 设计架构

3.2.3 网络部署

OFELIA项目从2010年9月开始启动，最初分别在iMinds、布里斯托尔大学、ETHZ、i2CAT和TUB这5个区域建立了试验床，到目前为止，OFELIA的规模已经发展超过10个区域，如图8所示。OFELIA的第一个建设阶段持续了3年。第一个阶段完成后，OFELIA已经建设成了一个可编程、可扩展、协议无关且能快速部署网络创新的真实网络试验环境。目前OFELIA是一个可管控、尽力而为的服务提供商。基于OpenFlow协议，OFELIA

允许试验部署在多层次、多区域的网络上，为未来网络的技术创新提供了真实的试验环境。

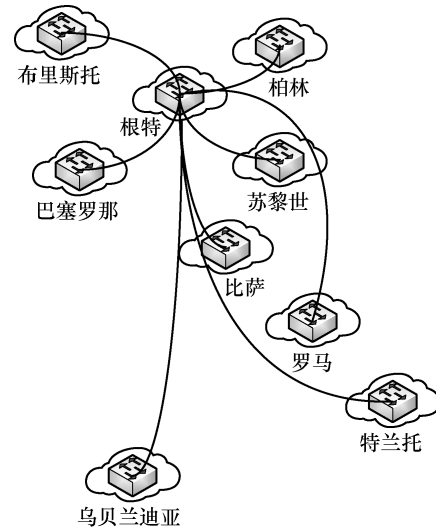


图 8 OFELIA 部署情况

3.2.4 特色应用

在OFELIA上实施的基于SDN和OpenFlow的ICN架构试验，不仅能够支持现有的CCNx应用程序，还能够支持所有基于CCN/NDN的ICN协议，可拓展性非常强。

3.3 RISE

3.3.1 设计目标和项目进展

2009年以来，日本信息通信研究机构NICT一直在JGN-X^[26]上开发用于大规模网络试验研究的基础设施（RISE），其目标是为网络研究者提供一个多租户、大规模的环境，用于验证SDN试验。RISE向公众开放，而且被授权的用户可以自己决定所获取RISE资源的试验要求^[27]。至今为止，RISE已经更新了3个版本。

RISE 1.0发布于2009年，其OpenFlow交换机之间使用Q-in-Q^[28]传送用户数据分组，不支持切片，试验用户需要占用整个OpenFlow网络，也无法向用户提供虚拟机。2011年11月，RISE 2.0发布，相比RISE1.0有了3个主要的改进：物理基础设施可以由多用户共享；用伪线（Pseudo-Wire）技术替代Q-in-Q实现站点互联；可以向用户提供虚拟机。不过RISE2.0仍然存在以下2个问题：并发用户容量小；底层网络拓扑结构不灵活。为了解决这些问题，NICT于2014年在RISE 3.0中设计出分层的OpenFlow网络，包括用户切片层、拓扑虚拟化层以及物理路径层。

3.3.2 关键技术

1) 管理技术

RISE 旨在按照用户要求提供定制的可自动部署的 SDN 试验。RISE3.0 中发展起来的 RISE 编排器^[29]可以帮助 RISE 管理员管理网络和用户试验。

RISE 中通过浏览器和用户进行交互，使用 RESTful 应用编程接口接收试验配置和监视试验状态。项目管理器管理所有的底层资源和上层试验并指导相关管理模块提供虚拟服务器和虚拟机。通过发送和接收帧，RISE 编排器可以知道物理网络和用户预配置的试验网络的全部拓扑信息，该信息可用于管理物理 OpenFlow 交换机中的流表项，用户可以方便、快捷地使用 RISE 编排器定制试验。

2) 组网技术

JGN-X 是一个基于 VLAN 的网络试验床，RISE 起初在 JGN-X 中使用 Q-in-Q 运行覆盖网络，然而使用 Q-in-Q 技术导致了很多问题。自 RISE2.0 之后，人们一致认为 EoMPLS 技术是最适合管理 JGN-X 中 OpenFlow 网络的技术。

Q-in-Q 隧道技术中，内部标签被称之为用户 VLAN 标签 (C-VLAN)，它用于本地且对运营商网络透明。外部标签被称之为运营商 VLAN 标签 (S-VLAN)，在运营商网络唯一地标识一个用户。RISE1.0 中使用 Q-in-Q 隧道，当一个带有 C-VLAN 标签的数据分组到达 JGN-X 网络，在入口设备上加入一个 S-VLAN 来穿越 JGN-X 网络，并在出口设备处移除 S-VLAN。当使用 Q-in-Q 时，RISE 用户的物理地址不得不暴露给 JGN-X 交换机，因此，当用户网络连接大量设备时，这些可能会导致 JGN-X 交换机的 MAC 表项溢出。

MPLS 是一种可以封装多种网络协议的高性能通信组网机制，EoMPLS 部署在运营商的网络边缘，维护以太网 VLAN 标签和 MPLS 标签之间用于隧道技术的映射关系。RISE2.0 采用 EoMPLS 的伪线技术，用来替代 Q-in-Q，因为转发依赖于 MPLS 标签而不是物理地址，解决了 JGN-X 交换机 MAC 表项溢出的问题。除此之外，一个 MPLS 标签比 VLAN 标签更长，使 RISE 的组网扩展性更好。

3) 切片技术

在 RISE1.0 中，用户请求在 RISE 上进行试验时，直到试验完成前，将会一直占用整个 OpenFlow 资源，即 RISE1.0 是基于时间进行切片

的，没有遵照多租户的初始设计目标。RISE2.0 可以同时提供 16 个虚拟交换机实例，为了区分不同切片的流量，用户虚拟机使用特定的 VLAN 标签来发分组，所以 VLAN 字段必须对用户的控制器隐藏。虽然 RISE2.0 在一定程度上实现了网络切片，但 16 个切片数量是不可拓展的，而且该方法也不够灵活，因为每个切片的拓扑是由固定的 JGN-X 拓扑决定的。

在 RISE3.0 中，为了得到更多的、灵活的切片，RISE 网络和 JGN-X 网络之间嵌入了拓扑虚拟化层^[30]。如图 9 所示，拓扑虚拟化层通过物理地址重写将“逻辑路径”映射至 JGN-X 网络，从而从 JGN-X 网络中分离出用户 OpenFlow 网络的拓扑。基于这种方法，切片的规模拓展了 2~3 倍，最大数量可以超过 50 个。然而，使用物理地址重写依然有一些缺点，例如，地址重写将会给网络排错带来麻烦，分组重写也会带来更多开销。

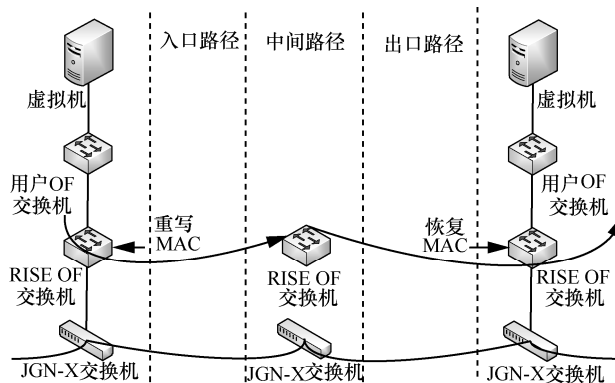


图 9 RISE 通过改写 MAC 地址来实现网络切片

3.3.3 网络部署

迄今为止，RISE 有 10 个日本站点和 3 个其他地区站点^[31]（分别为洛杉矶、曼谷和新加坡），它们都被称之为 EVN，如图 10 所示。EVN 之上是 OpenFlow 网络和 OpenFlow 交换机，所有的 OpenFlow 网络都是建立在 EVN 之上的逻辑（虚拟）网络，东京作为拓扑中心直联洛杉矶、曼谷和新加坡。虽然物理的部署不是一个全网状拓扑，但是用户可以通过拓扑虚拟化层请求多样化的拓扑来进行试验。

3.3.4 特色应用

RISE 上的 Snow Festive 应用实现了世界上第一例在长距离 IP 网络情况下的 8K 视频流传输，成功支持了 IP 网络下速度超过 36 Gbit/s 的 4K/8K 无

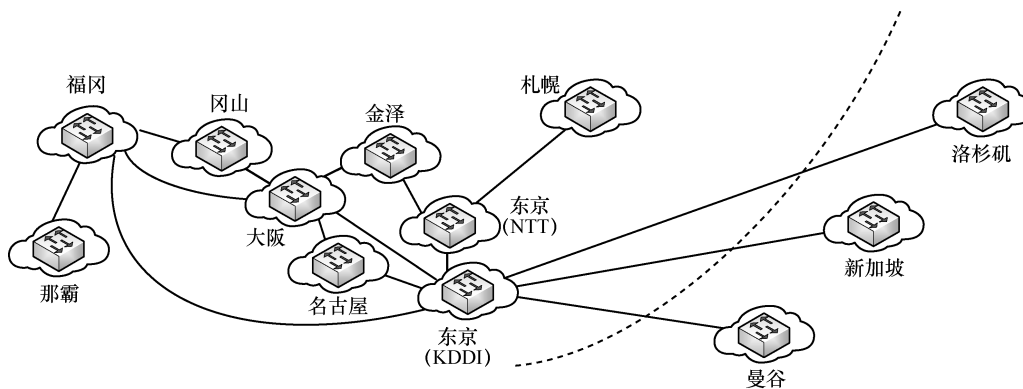


图 10 RISE 部署情况

压缩传输和速度在 1 Gbit/s 以内的 HD/4K 压缩视频流传输。

3.4 OF@TEIN

3.4.1 设计目标和项目进展

OF@TEIN 发源于 2012 年，由韩国政府通过国家信息社会局赞助。它的目标是在 TEIN4 (trans-eurasia information network 4) 上逐渐建立起支持 OpenFlow 的 SDN 试验床。OF@TEIN 由韩国大学和国际合作机构联合执行，由韩国光州科技学会牵头。OF@TEIN 的设计侧重于 3 个任务：设计 SmartX 机架并进行验证、多站点部署和互联、开发一些有用的 SDN 工具。OF@TEIN 目前不再对公众开放。

3.4.2 关键技术

1) 管理技术

参考 OFELIA 管理技术，OF@TEIN 开发了 OF@TEIN Portal，可以通过试验用户界面创造切片和监视试验状态。通过前端接口，SmartX 机架和网络资源可以被聚合起来为试验提供所需资源。OF@TEIN 还建立了 SmartX 自动中心用来管理基础设施。

2) 组网技术

OF@TEIN 网络通过具有 OpenFlow 感知封装器功能的 NVGRE 隧道技术实现站点互联^[32]。在 OF@TEIN 的每一个站点内已经设计、开发和部署了各种类型的 SmartX 机架，这些机架要么是包含连接到虚拟机服务器的 OpenvSwitch，要么是包含连接到虚拟机服务器的 OpenFlow 数据平面设备。这些站点中，跨广域网互联的数据平面由 SmartX 机架中的隧道封装节点实施。

OF@TEIN 的控制和管理网络被设计成一个带外的覆盖网络，除了使用 OpenFlow 控制隧道转

发之外，OF@TEIN 管理员还可以通过 OVSDB 协议远程管理隧道^[33]，这增强了站点间组网的自动化能力。

3) 切片技术

OF@TEIN 使用 FlowVisor 进行基于 VLAN 的切片。用户的 Flowspace 包括 switch ID 和 Port ID，流量在入口交换机处被标记上切片的 VLAN，沿途交换机发送 PacketIn 消息时会携带该 VLAN 标识，FlowVisor 通过该标识在不同试验用户的控制器间进行分流，在出口交换机处该 VLAN 标识会被剥离掉。

3.4.3 网络部署

如图 11 所示，OF@TEIN^[34]通过 TEIN4 国际网络将分布在 7 个国家（韩国、印度尼西亚、马来西亚、泰国、越南、菲律宾以及巴基斯坦）的 12 个站点连接起来。在图 11 中，实线和虚线分别表示主要路径和次要路径。

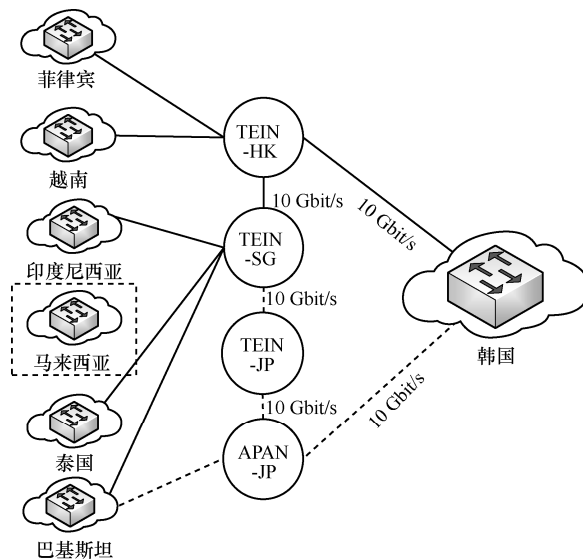


图 11 OF@TEIN 部署情况

3.4.4 特色应用

在 OF@TEIN 上进行的原型媒体分发试验定义了清晰的实验生命周期，基于 SDN 和资源预留技术，扩展了基于工作流的实验控制策略，同时更好地发挥了 DevOps 工具在实验生命周期各阶段提供自动部署的能力。

3.5 C-Lab 试验床

3.5.1 设计目标和项目进展

2012 年开始，北京邮电大学和江苏省未来网络创新研究院联合构建了一个基于 SDN 的试验网——计算存储网络协同管控的虚拟化网络试验平台（C-Lab）。

C-Lab 的主要目标是为了支撑国家级“未来网络试验设施（CENI）”项目的建设，服务下一代网络体系架构和关键技术的研究，支持创新型网络体系架构和关键技术的试验验证，如服务定制网络 SCN（service customized networking）、应用驱动网络 AND（application driving network）、超融合网络、物联网、工业互联网、4K/8K/AR/VR、云计算等。CENI 的核心技术主要包括可扩展的网络操作系统、网络虚拟化平台、可编程芯片、转发设备以及网络安全技术等。目前，CENI 项目已经正式立项启动，包含 IPv6、可编程网络、SDN 等多条技术路线，C-Lab 的相关成果将为 CENI 项目中构建一个端到端 SDN 试验网提供有力支撑。

C-Lab 平台项目的发展分 2 期进行，一期是基础平台构建，重点完成基础试验网络建设，完成光网络融合、无线网络接入、业务应用等几个方面的建设与初步应用试验示范，实现内部开放运行；二期在第一期基础上进一步扩大网络规模，实现虚网之间的高效隔离，同时增加网络管理、网络测量、网络安全、云计算、物联网、应用工具等方面的建设，进行了更大规模的测试试验与应用示范，正式上线开放运行。

目前，C-Lab 平台通过解决网络虚拟化标识、资源映射、计算存储融合等问题，已经支持了一批网络领域基金项目的成果试验验证，促进了科研成果更加接近实际应用环境，加快了科研成果的产业化速度，取得了阶段性的成果。

3.5.2 关键技术

1) 管理技术

C-Lab 研发了试验平台的控制框架 CCF，通过 CCF 管理平台，可以对底层各种网络资源进行调度

与整合，并对平台的参数进行设置，以便试验用户的相关操作。一个 C-Lab 试验的生命周期包括 3 个阶段：设计、执行和完成。第 1 个阶段，用户登录 CCF 门户并根据自己的需求设计他们的试验，负责虚拟化的 CNVP 模块调用底层可用资源来创建虚拟网络切片。第 2 个阶段，用户登录创建的控制节点和虚拟机节点进行试验。第 3 个阶段，用户完成试验，获取数据并释放资源。此外，随着跨域组网、多域协同管控、多功能试验网元等需求的出现，C-Lab 还继续研发了 SDN 跨域虚网通信、网络服务编排以及虚拟网元管理技术，进一步丰富了管控平面功能。

2) 组网技术

考虑到试验平台的可扩展性、设备性价比、协议支持灵活性等因素，C-Lab 试验平台初期建设采用了部署更加灵活的 Open vSwitch 方案，即通过在多网卡服务器上安装 Open vSwitch，以实现 OpenFlow 交换机功能。初期采用这种方式可以按需创建虚拟交换节点、动态更改网络拓扑以及配置网络资源，方便试验者进行各种试验以及对 OpenFlow 技术的探索和使用。

随着 SDN 产业的发展，同时为了增加试验平台的设备多样性，C-Lab 逐步引入了支持 OpenFlow 的商用 SDN 设备作为网络核心节点。在保证设备灵活性、协议支持度以及流表匹配功能等基本特征的基础上，根据不同的业务需求分别部署在汇聚和出口位置。

3) 切片技术

C-Lab 借鉴了 GENI 中 FlowVisor 的虚拟化切片方案，并在此基础上应用了团队研发的基于 SDN 的高效隔离的网络虚拟化技术——CNVP 技术。CNVP 针对当前网络虚拟化技术依赖于分布式协议、效率低的问题，基于软件定义网络技术实现了集中式高效率的网络虚拟化系统，重点攻克了其中的 3 个关键问题：基于 SDN 集中代理节点上下行信令实时处理的虚拟化切片技术、基于 SDN 的虚拟化流规则冲突的检测与隔离技术以及低时延高资源利用率联合优化的虚拟网络映射算法。

3.5.3 网络部署

C-Lab 总体为分级分域结构，在每个域部署一个控制器，从而共同组成基础控制平面，提供虚拟化网络切片服务，域间部署超级控制器管理跨域流量。目前，北京邮电大学已建成 30 多个核心节点和

部分接入节点,覆盖北京邮电大学新科研楼、网络中心、主楼、教三楼等区域,并与江苏省未来网络创新研究院、华南理工大学、华中科技大学、西安交通大学、重庆邮电大学等网络节点通过隧道实现了互联。

3.5.4 特色应用

在 C-Lab 上运行着国内多个高校和研究机构的关于未来网络架构和关键技术的研究,例如,面向服务的未来网络体系架构、ONOS 控制器故障检测模块、内容中心网络等。

4 技术挑战与研究展望

4.1 切片技术

SDN 试验床的网络切片机制能够对试验床的物理资源进行切分并重新整合分配给不同的用户,这对于网络的动态灵活性和资源利用率提升具有重要意义。

基于流空间和基于固定标签是目前常用的 2 种切片标识思路。在基于流空间中,基于 OpenFlow v1.0 开发的第一代 SDN 切片工具 FlowVisor 作为透明代理位于 SDN 控制器和底层交换机之间。FlowVisor 利用了 OpenFlow v1.0 中的 12 元组进行切片,但仍存在不少局限性,比如虚网和物理网络没有完全解耦,虚网拓扑受限于物理拓扑,基于流空间的切片标识方式也无法做到地址虚拟化。在基于固定标签中,VLAN 标签通常被用作切片标识,GENI、OFELIA 和 RISE 都有用到 VLAN 标签,但 VLAN 标签有限的位数只能容纳不超过 4 096 张虚网,有可能不满足现实需求。

后续的多个研究方案就 FlowVisor 在切片标识、链路虚拟化、节点虚拟化上的局限性做出了针对性的改进。例如,OVX 利用改写 MAC 地址的方式来实现地址虚拟化,同时也避免了使用 VLAN 标签而导致的虚网容量瓶颈。OFELIA 中的 VeRTIGO 使用了链路虚拟化技术来解耦虚网拓扑与物理拓扑。

切片技术领域仍然有许多问题值得进一步研究。目前,切片方案大多重点关注数据层面的地址虚拟化和拓扑虚拟化,对控制层的性能隔离研究较少。在网络虚拟化场景中,虚网的控制流量一般会经过切片工具,若缺少好的隔离机制,虚网的性能同样会受到影响。此外,切片技术可以结合先进的虚拟化映射算法来提供更加灵活的虚拟化方案^[35-37]。同时,当试验床的规模进一步增长时,切片工具的扩

展性可能会成为性能瓶颈,如何设计满足大规模网络切片需求的虚拟化系统也是一个重点的研究方向。

4.2 光和无线设备的兼容

为了支持在不同网络域多样化的研究,SDN 试验床在数据平面不应该仅仅是基于 SDN 交换机,而且应该支持 SDN 无线和光设备,并且应该仔细考虑现存 IP 或电路域设备的兼容性,各类型异构设备都应该能以某种方式互联、控制和管理。

许多 SDN 试验床已经在研究这个问题。GENI 将 SDN 引入 WiMAX 并实现了软件定义无线接入的原型系统。通过将 GMPLS 整合到 OpenFlow 控制器中,OFELIA 支持了对光交换的控制。为了拓展 OpenFlow 试验床能力,RISE 也致力于为试验床提供不同的接入方式。

当前,多种设备组网技术可以归类为以下 2 种。第一种是在相应的网络域拓展 SDN 南向协议,比如 OpenFlow;第二种是兼容当前控制和管理技术,如 SNMP 和 GMPLS,将其作为 SDN 控制器和 SDN 转发设备的翻译器。除此之外,控制上的相关协议应用也需要统一的控制,例如,Alien 是 OFELIA 的一个子项目,它提出了硬件抽象层,用于多种设备组网的系统查询。

4.3 安全性

SDN 技术带来了网络的可编程性,与此同时也导致了一些安全漏洞,这将直接威胁基于 SDN 的网络试验床的稳定性:在网络试验床上并发运行的试验数量众多,而且网络试验环境处于动态变化之中,如果没有可靠的安全机制确保试验的正常运行,当试验环境受到恶意或无意的攻击时,这些并行的网络试验一定会互相干扰,从而导致试验数据的失真,甚至导致系统的崩溃。因此,试验床必须采取有效的安全机制,保证试验环境之间的独立性以及试验资源调度的合理性。目前,因为控制平面与数据平面相对隔离,SDN 在网络安全方面有一定的特殊性,针对这种特殊架构的 SDN 安全解决方案仍在不断研究中,并成为了一个重要的方向。

4.4 可靠性

网络正在向虚拟化和软件化发展,这种趋势下,应用具有低成本、高控制精度和部署灵活的优势。然而,在这种软件定义的网络环境下,试验床系统的可靠性问题比较复杂。例如,传统的故障检测机制使用心跳机制,即远程节点在足够长的时间内没

有心跳则显示出错。然而 SDN 试验床在控制平面和数据平面之间引入虚拟控制平面，以实现虚拟资源向物理资源的映射，由于 SDN 网络的控制/数据/虚拟化多元网络域问题，实现可靠的软件体系的试验床变得更加困难。目前，尽管在各个网络域如 OpenFlow 交换节点、数据平面链路层以及控制器集群，都有一些对于故障恢复的研究，但是在针对分离网络域的失败检测和故障恢复的统一管理方面仍有很大的研究空间。

5 结束语

本文对全球 SDN 试验床的研究和建设进行了综述性介绍。首先讨论了 SDN 试验床相比传统网络试验床的优势以及大规模 SDN 试验床的基本设计原则；其次从项目目标与进展情况、关键技术、网络部署和特色应用 4 个方面对已有的网络试验床项目进行了深入分析；最后介绍了该领域面临的挑战和未来可行的研究方向。

基于 SDN 技术构建网络试验床是一个仍在发展完善中的技术方向，不仅有利于对网络技术创新进行验证，也为基于新网络技术进行网络建设、网络运营和网络管理提供了一定的借鉴和参考，有助于未来网络能够更快更好的发展。

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] SHERWOOD R, GIBB G, YAP K K, et al. Can the production network be the testbed?[C]//OSDI. 2010, 10: 1-6.
- [3] GEROLA M, CORIN R D, DE PELLEGRINI R R F, et al. Demonstrating inter-testbed network virtualization in OFELIA SDN experimental facility[C]//2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2013: 39-40.
- [4] HAN S, LEE S. Implementing SDN and network-hypervisor based programmable network using pi stack switch[C]//International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). 2015: 579-581.
- [5] BERMAN M, CHASE J S, LANDWEBER L, et al. GENI: a federated testbed for innovative network experiments[J]. Computer Networks, 2014, 61: 5-23.
- [6] SUÑÉ M, BERGESIO L, WOESNER H, et al. Design and implementation of the OFELIA FP7 facility: the European OpenFlow testbed[J]. Computer Networks, 2014, 61: 132-150.
- [7] KANAUMI Y, SAITO S, KAWAI E, et al. RISE: a wide-area hybrid OpenFlow network testbed[J]. IEICE Transactions on Communications, 2013, 96(1): 108-118.
- [8] KIM J W, CHA B R, KIM J, et al. OF@ TEIN: an OpenFlow-enabled SDN testbed over international SmartX rack sites[J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013, 36: 17-22.
- [9] KIVITY A, KAMAY Y, LAOR D, et al. KVM: the Linux virtual machine monitor[C]//The Linux Symposium. 2007: 225-230.
- [10] BARHAM P, DRAGOVIĆ B, FRASER K, et al. XEN and the art of virtualization[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2003, 37(5): 164-177.
- [11] DAVIE B S, REKHTER Y. MPLS: technology and applications[M]. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000.
- [12] FARINACCI D, TRAINA P, HANKS S, et al. Generic routing encapsulation (GRE)[J]. 1994.
- [13] MEDVED J, VARGA R, TKACIK A, et al. Opendaylight: towards a model-driven SDN controller architecture[C]//15th International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 2014: 1-6.
- [14] BERDE P, GEROLA M, HART J, et al. ONOS: towards an open, distributed SDN OS[C]//The Third Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. 2014: 1-6.
- [15] SHERWOOD R, GIBB G, YAP K K, et al. Flowvisor: a network virtualization layer[J]. OpenFlow Switch Consortium, Tech. Rep, 2009, 1: 132.
- [16] AL-SHABIBI A, DE LEENHEER M, GEROLA M, et al. OpenVirteX: make your virtual SDNs programmable[C]//The Third Workshop on Hot topics in Software Defined Networking. 2014: 25-30.
- [17] GALIZA D F H S, SCHWARZ M F, AGUIAR B J, et al. Deploying SDN experiments in Latin America: the ONOS and SDN-IP application use case at AmLight[J]. 2016.
- [18] CORIN R D, GEROLA M, RIGGIO R, et al. Vertigo: network virtualization and beyond[C]// 2012 European Workshop on Software Defined Networking (EWSN). 2012: 24-29.
- [19] DAS S. Extensions to the OpenFlow protocol in support of circuit switching[J]. 2010.
- [20] WANG Q, XU K, IZARD R, et al. GENI cinema: an SDN-assisted scalable live video streaming service[C]// 2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols (ICNP). 2014: 529-532.
- [21] KÖPSEL A, WOESNER H. OFELIA-pan-european test facility for OpenFlow experimentation[C]//European Conference on a Service-Based Internet. 2011: 311-312.
- [22] LIEBOWITZ K, LIEBOWITZ T, SKLAVER D. Interactive opt-in-messaging: U.S. patent application 11/298,109[P]. 2006-11-16.
- [23] BRUN R, URBAN L, CARMINATI F, et al. Geant: detector description and simulation tool[R]. CERN, 1993.
- [24] PFAFF B, PETTIT J, KOPONEN T, et al. The design and implementation of open vSwitch[C]//NSDI. 2015: 117-130.
- [25] RIGGIO R, DE PELLEGRINI F, SALVADORI E, et al. Progressive virtual topology embedding in OpenFlow networks[C]//2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013). 2013: 1122-1128.
- [26] KANAUMI Y, SAITO S, KAWAI E, et al. Deployment and operation

- of wide-area hybrid OpenFlow networks[C]//Network Operations and Management Symposium (NOMS). 2012: 1135-1142.
- [27] ISHII S, KAWAI E, KANAUMI Y, et al. A study on designing OpenFlow controller RISE 3.0[C]//2013 19th IEEE International Conference on Networks (ICON). 2013: 1-5.
- [28] MAHALINGAM M, DUTT D, DUDA K, et al. Virtual extensible local area network (VXLAN): a framework for overlaying virtualized layer 2 networks over layer 3 networks[R]. 2014.
- [29] KANAUMI Y, SAITO S, KAWAI E, et al. RISE: a wide-area hybrid OpenFlow network testbed[J]. IEICE Transactions on Communications, 2013, 96(1): 108-118.
- [30] GRENZ J. RISE 3.0 workshop SEGES[J]. Personal Communication, 2016.
- [31] GAGLIARDI F, JONES B, REALE M, et al. European DataGrid project: experiences of deploying a large scale testbed for E-science applications[C]//IFIP International Symposium on Computer Performance Modeling, Measurement and Evaluation. 2002: 480-499.
- [32] KIM N, KIM J W, HEERMANN C, et al. Interconnecting international network substrates for networking experiments[C]//TRIDENTCOM. 2011: 116-125.
- [33] PFAFF B, DAVIE B. The open vSwitch database management protocol[J]. 2013.
- [34] KIM J, CHA B, KIM J, et al. OF@ TEIN: an OpenFlow-enabled SDN testbed over international SmartX Rack sites[J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013, 36: 17-22.
- [35] YU M, YI Y, REXFORD J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [36] CHOWDHURY N M M K, RAHMAN M R, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[C]//INFOCOM 2009. 2009: 783-791.
- [37] CHENG X, SU S, ZHANG Z, et al. Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 38-47.

[作者简介]



黄韬 (1980-), 男, 重庆人, 北京邮电大学教授, 江苏省未来网络创新研究院副院长, 主要研究方向为未来网络体系架构、软件定义网络、网络虚拟化等。

刘江 (1983-), 男, 河南郑州人, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为未来网络体系架构、网络虚拟化、软件定义网络、信息中心网络等。

张晨 (1991-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为软件定义网络、网络虚拟化、云网络。

魏亮 (1981-), 男, 江苏扬州人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为软件定义网络、网络虚拟化。

刘韵洁 (1943-), 男, 山东烟台人, 中国工程院院士, 江苏省未来网络创新研究院院长, 主要研究方向为未来网络、移动互联网和物联网。