

访问提供者：
Hytera Communication Corp.Ltd
登出

浏览

我的设置

文件柜

得到帮助

广告

期刊和杂志 > IEEE Access > 卷：6IEEE Access > 卷：6IEEE Access > 卷：6

应用驱动的端到端切片：当无线网络虚拟化与基于NFV的移动边缘计算协调时

7作者 (S)

凯哈; 盛生李; Shaofei Tang; 黄慧柏; 四成赵; 桂瑞夫; 朱祖清

查看所有作者

1
纸
引文

991
充分
文字视图

开放存取

评论)

导出到
Collabratec

警报

管理内容提醒
添加到引文提醒

更喜欢这个

软件定义网络中动态服务链的确定性服务质量保证
IEEE网络和服务管理交易
发布时间：2017年

利用软件定义网络和云计算增强移动网络
IEEE / ACM网络交易
发布时间：2017年

查看更多

请参阅本文中提到的技术专利的顶级组织



单击以展开

Provided by: Innovation Plus
POWERED BY IEEE AND IP.COM
A PATENT SEARCH AND ANALYTICS TOOL

抽象

文件部分

一世. 介绍

II. 相关工作

III. 系统设计与实现

IV. 实验演示

V. 结论

作者

数据

参考

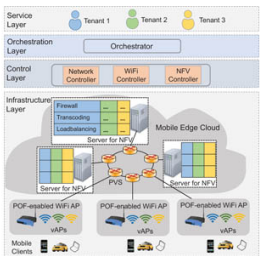
引文

关键词

度量

更喜欢这个

下载
PDF



我们提出的ADE²WiNFV系统的架构。

摘要：最近，为了适应新兴应用的各种服务质量（QoS）要求，应用驱动的网络切片引起了广泛的兴趣。在..... [查看更多](#)

元数据

抽象：

最近，为了适应新兴应用的各种服务质量（QoS）要求，应用驱动的网络切片引起了广泛的兴趣。在本文中，我们将软件定义无线网络虚拟化（WiNV）的思想应用于WiFi网络，并设计和演示一种新颖的网络系统，即ADE²WiNFV。所提出的系统可以利用基于网络功能虚拟化的移动边缘计算（MEC）来编排软件定义的WiNV，以实现异构有线/无线网络上的应用驱动的端到端（E2E）切片。我们的实验演示验证了ADE²WiNFV可以按需实现应用感知的端到端分片，每个分片不仅包含有保障的E2E带宽资源（即，以虚拟链路，虚拟交换机和虚拟接入点的形式），还包含隔离的IT资源（即，形式（虚拟网络功能）用于承载具有QoS保证的特定应用程序。

发表于： IEEE Access （卷：6）

页数： 26567 - 26577

出版日期： 2018年5月9日

电子ISSN： 2169-3536

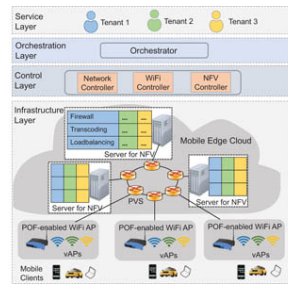
INSPEC登录号： 17812278

DOI： 10.1109 / ACCESS.2018.2834623

出版商： IEEE

赞助商： IEEE

资助机构：



我们提出的ADE²WiNFV系统的架构。

隐藏完整摘要 ^

引文图

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021, San Jose, CA, USA, [online] Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
Show Context Google Scholar

2. *Infrastructure Report 2014: Ofcom's Second Full Analysis of the UK's Communications Infrastructure*, Apr. 2018, [online] Available: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/research/infrastructure/2014/infrastructure-14.pdf>.
Show Context Google Scholar

3. P. Lu, Q. Sun, K. Wu, Z. Zhu, "Distributed online hybrid cloud management for profit-driven multimedia cloud computing", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 17, pp. 1297-1308, Aug. 2015.
Show Context View Article Full Text: PDF (2547KB) Google Scholar

4. N. Xue, X. Chen, S. Li, L. Gong, D. Hu, Z. Zhu, "Demonstration of OpenFlow-controlled network orchestration for adaptive SVC video multycast", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 17, no. 9, pp. 1617-1629, Sep. 2015.
Show Context View Article Full Text: PDF (1963KB) Google Scholar

5. J. Yao, P. Lu, L. Gong, Z. Zhu, "On fast and coordinated data backup in geo-distributed optical inter-datacenter networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 14, pp. 3005-3015, Jul. 2015.
Show Context Google Scholar

6. Z. Zhu, B. Kong, J. Yin, S. Zhao, S. Li, "Build to tenants' requirements: On-demand application-driven vSD-EON slicing", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, pp. A206-A215, Feb. 2018.
Show Context CrossRef Google Scholar

7. *5G White Paper*, 2015, [online] Available: https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf.
Show Context Google Scholar

8. L. Gong, Z. Zhu, "Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 450-460, Feb. 2014.
Show Context View Article Full Text: PDF (2502KB) Google Scholar

9. H. Jiang, Y. Wang, L. Gong, Z. Zhu, "Availability-aware survivable virtual network embedding in optical datacenter networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, pp. 1160-1171, Dec. 2015.
Show Context View Article Full Text: PDF (602KB) Google Scholar

10. L. Gong, H. Jiang, Y. Wang, Z. Zhu, "Novel location-constrained virtual network embedding LC-VNE algorithms towards integrated node and link mapping", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 24, no. 6, pp. 3648-3661, Dec. 2016.
Show Context View Article Full Text: PDF (2598KB) Google Scholar

11. D. Kreutz, F. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey", *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2015.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(14201KB\)](#) [Google Scholar](#)

12. Z. Zhu et al., "Demonstration of cooperative resource allocation in an openflow-controlled multidomain and multinational SD-EON testbed", *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1508-1514, Apr. 2015.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(1069KB\)](#) [Google Scholar](#)

13. X. Chen, S. Zhu, L. Jiang, Z. Zhu, "On spectrum efficient failure-independent path protection p-cycle design in elastic optical networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, pp. 3719-3729, Sep. 2015.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(1497KB\)](#) [Google Scholar](#)

14. S. Li et al., "Protocol oblivious forwarding (POF): Software-defined networking with enhanced programmability", *IEEE Netw.*, vol. 31, no. 2, pp. 58-66, Mar. /Apr. 2017.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(364KB\)](#) [Google Scholar](#)

15. A. Al-Shabibi, M. De Leenheer, M. Gerola, A. Koshibe, W. Snow, G. Parulkar, "OpenVirteX: A network hypervisor", *Proc. ONS*, pp. 25-30, Aug. 2014.
[Show Context](#) [Access at ACM](#) [Google Scholar](#)

16. X. X. Jin, J. Gossels, J. Rexford, D. Walker, "CoVisor: A compositional hypervisor for software-defined networks", *Proc. 12th USENIX Symp. Netw. Syst. Design Implem. (NSDI)*, pp. 87-101, May 2015.
[Show Context](#) [Google Scholar](#)

17. S. Li et al., "SR-PVX: A source routing based network virtualization hypervisor to enable POF-FIS programmability in vSDNs", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7659-7666, 2017.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(5366KB\)](#) [Google Scholar](#)

18. H. Huang et al., "Realizing highly-available scalable and protocol-independent vSDN slicing with a distributed network hypervisor system", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13513-13522, 2018.
[Show Context](#) [View Article](#) [Full Text: PDF \(5988KB\)](#) [Google Scholar](#)

19. J. Liu, W. Lu, F. Zhou, P. Lu, Z. Zhu, "关于动态服务功能链部署和重新调整", *IEEE Trans. 网络. 服务管理.*, 第一卷 14, 没有. 3, pp.543-553, 2017年9月.
[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF \(866KB\)](#) [Google学术搜索](#)

20. R. Cziva, DP Pezaros, "集装箱网络功能: 将NFV带入网络边缘", *IEEE Commun. MAG.*, 第一卷 55, 不. 6, pp.24-31, 2017年6月.
[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF \(360KB\)](#) [Google学术搜索](#)

21. M. Richart, J. Baliosian, J. Serrat, J.-L. Gorricho, "虚拟无线网络中的资源切片: 一项调查", *IEEE Trans. 网络. SERV. 管理.*, 第一卷 13, 不. 3, pp.462-476, 2016年9月.
[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF \(799KB\)](#) [Google学术搜索](#)

22. K. Han等人, "利用协议不经意转发 (POF) 实现NFV辅助移动性管理", *PROC. GLOBECOM*, 第1-6页, 2017年12月.
[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF \(429KB\)](#) [Google学术搜索](#)

23. *OpenFlow交换机规范*, 2018年4月, [在线]可用:
<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.0.noipr.PDF>.
[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

24. A. Patro, S. Banerjee, "COAP: 通过开放API进行家庭WLAN管理的软件定义方法", *Proc. MobiArch*, 第31-36页, 2014年9月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

25. J. Lee等人, "meSDN: SDN的移动扩展", *Proc. MCS*, 第7-14页, 2014年6月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

26. L. Suresh, J. Schulz-Zander, R. Merz, A. Feldmann, T. Vazao, "迈向可编程企业WLANS with Odin", *Proc. HotSDN*, 第115-120页, 2012年8月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

27. J. Schulz-Zander, C. Mayer, B. Ciobotaru, S. Schmid, A. Feldmann, "OpenSDWN: 对家庭和企业WiFi的程序化控制", *Proc. SOSR*, 2015年6月。

显示上下文 Google学术搜索

28. P.包西蒙等人, "P4: 编程协议无关的分组处理器", *SIGCOMM COMPUT. COMMUN. Rev.*, vol. 44, pp.87-95, 2014年7月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

29. S. Li等人, "使用协议不经意的源路由提高SDN可扩展性: 系统级研究", *IEEE Trans. 网络. SERV. MANAG.*, 第一卷 15, 不. 1, pp.275-288, 2018年3月。

显示上下文 查看文章 全文: PDF (2344KB) Google学术搜索

30. D. Hu, S. Li, H. Huang, W. Fang, Z. Zhu, "灵活流汇聚: 关于协议遗忘转发(POF)的转发平面可编程性的系统案例研究", *IEEE Access*, vol. 4, pp.4707-4719, 2016。

显示上下文 查看文章 全文: PDF (12121KB) Google学术搜索

31. S. Li, D. Hu, W. Fang, Z. Zhu, "使用协议不经意转发(POF)的源路由, 以实现有效的电子卫生数据传输", *Proc. ICC*, 第1-6页, 2016年5月。

显示上下文 Google学术搜索

32. D. Hu等人, "设计和演示基于SDN的灵活流融合协议 - 不经意转发(POF)", *Proc. GLOBECOM*, 第1-6页, 2015年12月。

显示上下文 Google学术搜索

33. Q. Sun, Y. Xue, S. Li, Z. Zhu, "设计和演示高吞吐量协议不经意的数据包转发以支持软件定义的车载网络", *IEEE Access*, vol. 5, pp.24004-24011, 2017。

显示上下文 查看文章 全文: PDF (6522KB) Google学术搜索

34. M. Chiosi等, 网络功能虚拟化, 2012, [在线]可用:

https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf。

显示上下文 Google学术搜索

35. W. Fang, M. Zeng, X. Liu, W. Lu, Z. Zhu, "用于数据中心弹性光网络中高仿vNF服务链的联合频谱和IT资源分配", *IEEE Commun. 快报*, 第一卷 20, 不. 8, pp.1539-1542, 2016年8月。

显示上下文 查看文章 全文: PDF (587KB) Google学术搜索

36. M. Zeng, W. Fang, Z. Zhu, "Orchestrating tree-type VNF forwarding graphs in inter-DC elastic optical networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 14, pp. 3330-3341, Jul. 2016.

Show Context View Article Full Text: PDF (2539KB) Google Scholar

37. J. Soares, M. Dias, J. Carapinha, B. Parreira, S. Sargento, "Cloud4NFV: A platform for virtual network functions", *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Cloud Netw. (CloudNet)*, pp. 288-293, Oct. 2014.

Show Context View Article Full Text: PDF (1308KB) Google Scholar

38. J. Martins et al., "Cloud4NFV and the next network function virtualization", *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Cloud Netw. (CloudNet)*, pp. 294-299, Oct. 2014.

38. J. Martins et al., "ClickOS and the art of network function virtualization", *Proc. NSDI*, pp. 459-473, Apr. 2014.

Show Context Google Scholar

39. L. Rizzo, "Netmap: A novel framework for fast packet I/O", *Proc. USENIX ATC*, pp. 9, Jun. 2012.

Show Context Google Scholar

40. J. Fontenla-Gonzalez et al., "Lightweight container-based OpenEPC deployment and its evaluation", *Proc. NetSoft*, pp. 435-440, Jun. 2016.

Show Context View Article Full Text: PDF (1299KB) Google Scholar

41. Z. Sanaei, S. Abolfazli, A. Gani, R. Buyya, "Heterogeneity in mobile cloud computing: Taxonomy and open challenges", *IEEE Commun. Surveys Tuts*, vol. 16, no. 1, pp. 369-392, 1st Quart. 2014.

Show Context View Article Full Text: PDF (3638KB) Google Scholar

42. J. Fajardo, I. Taboada, F. Liberal, "Improving content delivery efficiency through multi-layer mobile edge adaptation", *IEEE Netw.*, vol. 29, no. 6, pp. 40-46, Nov./Dec. 2015.

Show Context View Article Full Text: PDF (245KB) Google Scholar

43. *Hostapd*, Apr. 2018, [online] Available: <http://w1.fi/hostapd/>.

Show Context Google Scholar

44. *DPDK: Data Plane Development Kit*, Apr. 2018, [online] Available: <https://dpdk.org/>.

Show Context Google Scholar

45. *ONOS*, Apr. 2018, [online] Available: <https://onosproject.org/>.

Show Context Google Scholar

46. *IPERF*, Apr. 2018, [online] Available: <https://iperf.fr/>.

Show Context Google Scholar

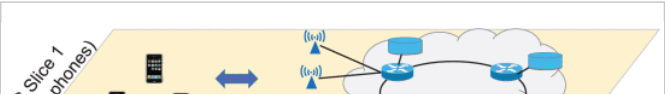
广告

≡ 内容

第一节
介绍

在过去的几十年中，无线移动设备的使用一直在快速增长。因此，移动数据流量呈指数级增长，这种趋势将在不久的将来继续[1]。同时，众所周知，在所有无线接入技术中，基于WiFi的无线接入技术使用最广泛，已经成为人们生活中不可或缺的一部分。例如，英国（英国）通信办公室最近报告称，英国81%的移动用户经常使用WiFi [2]。尽管WiFi具有便利性和成本效益，但它通常以尽力而为的方式工作，因此很难在诸如访问带宽，端到端延迟和服务可用性等指标上提供任何服务质量（QoS）保证。然而，越来越多的新兴应用需要这样的QoS保证[3] - [4] [5]，并且非常需要端到端的解决方案。这不仅给WiFi带来了新的挑战，也给连接WiFi接入点（AP）的有线网络带来了新的挑战。

通过利用切片/服务（SaaS）的概念，应用驱动的端到端（E2E）网络切片，可以解决上述挑战。具体而言，基础设施提供商（InP）创建各种网络片（/虚拟网络（VNT）），确保片内的某些类型的QoS保证，并将其租赁给租户，以便为最终用户提供不同的服务[6]。在图1中，我们将未来的5G网络视为一个示例，其中在同一基板网络（SNT）上创建三个切片，以提供高吞吐量，低延迟和实时，低速率和非关键性分别为智能手机，自动驾驶汽车和大规模物联网（IoT）提供服务[7]。



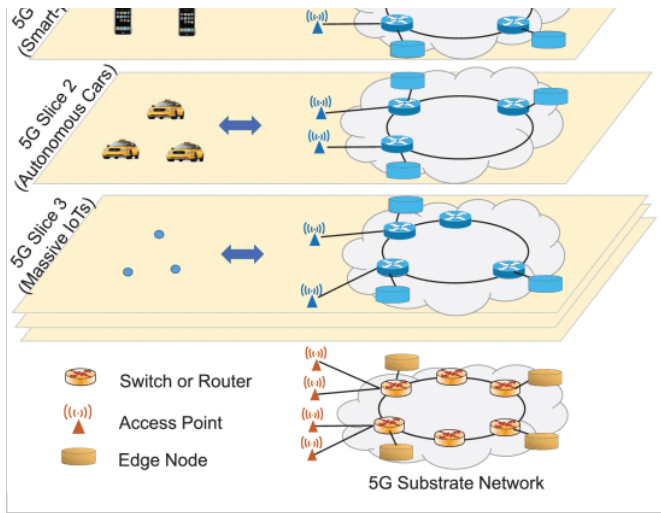


图1.
应用驱动的5E网络端到端网络切片。

为了实现SaaS，我们首先需要一种有效的虚拟网络嵌入（VNE）算法，该算法可以确定如何将VNT中的虚拟链路和节点映射到基板链路和节点上以满足某些优化目标。以前，已经对VNE的问题进行了深入研究，并且已经提出了许多算法来实现不同类型的SNT中的各种优化目标[8] - [9] [10]。然后，从系统实现的角度来看，软件定义网络（SDN）和网络虚拟化被认为是SaaS的关键支持技术。SDN将网络控制和管理（NC&M）与数据转发分离，并利用集中式NC和M来促进定制和QoS感知的路由和交换[11]- [12] [13] [14]。虽然网络虚拟化可以通过隔离网络资源来提供定制的网络环境，从而在共享SNT上实现VNT。因此，通过将SDN与网络虚拟化相结合，InP可以根据租户的QoS要求方便地构建VNT，以部署新兴应用，即实现应用驱动的网络切片。为此目的设计了几个现有的网络系统，例如OpenVirtex [15]，CoVisor [16]，SR-PVX [17]和DPVisor [18]。然而，由这些系统实现的应用驱动的网络切片仅覆盖网络的有线段，而WiFi段中的接入带宽很难被正确隔离，这意味着该解决方案不是“E2E”。这是因为WiFi使用共享介质进行数据传输而没有任何服务区分，因此难以将SDN策略应用于其以用于QoS保证。此外，众所周知，为了确保某些新兴应用的QoS，InP不仅需要网络侧的支持，还必须利用基于IT资源虚拟化的网络功能虚拟化（NFV）[19]，[20]。

为了实现端到端解决方案，人们最近引入了无线网络虚拟化（WiNV）的概念[21]，它可以根据应用需求将无线接入网络中的无线资源划分为逻辑片，并将这些分区正确隔离以实现QoS担保。同时，移动边缘计算（MEC）引起了广泛的兴趣，为网络边缘的移动用户提供计算能力，以简化核心网络运行并减少端到端延迟[20]。在这项工作中，我们将WiNV的概念应用于WiFi网络并扩展我们在[22]中的初步工作，以设计和演示一种新颖的网络系统，即ADE²WiNFV。所提出的系统可以利用基于NFV的MEC协调软件定义的网络虚拟化，以在异构有线/无线网络实现应用驱动的端到端切片。我们的贡献可归纳如下：

- 我们设计并实现了一个高度可编程的无线SDN交换机，它支持有线侧的协议无关数据包处理，并且可以在WiFi侧实现无线资源虚拟化（即，动态创建/移除虚拟AP并为它们分配接入带宽）。
- 我们实现了一个MEC系统，通过利用基于容器的NFV来提高应用驱动的端到端切片的性能，即虚拟网络功能（vNF）打包为docker镜像，可以在商用Linux服务器上按需实例化设置延迟时间短（即在一秒内）。
- 我们将有线/无线SDN交换机和MEC系统集成成为ADE²WiNFV，为租户提供灵活的虚拟化层，以请求应用感知切片并实现具有QoS保证的应用。

本文的其余部分安排如下。第二节讨论了相关工作。我们描述了ADE²WiNFV的系统架构，并在第III节中详细介绍了它的设计。实验演示见第四节。最后，第五节总结了论文。

第二节 相关工作

A. 软件定义的无线网络

作为最著名的SDN实现，OpenFlow (OF) [23]为逻辑集中控制器指定南向协议，以远程管理SDN交换机中的转发表。然而，OF不提供对WiFi的有效支持，因为即使在其最新版本（即OF v1.5）中，匹配字段也不解决IEEE 802.11帧。为了解决这个问题，Patro和Banerjee [24]扩展了OF中的匹配字段，以考虑WiFi帧并开发了开放API，以实现具有SDN控制器的家庭WiFi网络的NC&M。然而，该工作仅试图提高WiFi网络的无线信道利用率和总吞吐量，但没有考虑如何利用WiNV向不同的服务提供各种QoS保证。李等人。[25]设计了一个名为meSDN的系统来实现WiNV和WiFi上行链路的QoS保证管理。但是，meSDN的兼容性有些限制，因为它需要在移动客户端上应用修改。通过为移动客户端创建轻型虚拟AP，[26]和[27]中的研究试图提高WiFi网络中移动性管理的性能，并减少了切换延迟。然而，他们没有解决WiFi网络中具有各种QoS保证的服务提供问题。此外，这些研究仅在网络方面起作用，但没有尝试利用基于IT资源虚拟化的NFV。

上面提到的基于OF的方法的另一个缺点是它们的数据平面是协议相关的，即匹配字段都是基于现有网络协议来定义的。因此，当出现支持新协议的需要时，我们必须扩展OF以包括更多匹配字段，这将使OF变得越来越复杂。为了实现面向未来且与协议无关的数据平面，人们提出了P4 [28]和协议不经意转发 (POF) [14]。POF将数据包字段称为元组 $\langle offset, length \rangle$ ，其中 $offset$ 表示数据包中字段的起始位置， $length$ 表示其以位为单位的长度[29]。因此，POF交换机可以利用元组 $\langle offset, length \rangle$ 来定位数据包中的任何数据，然后使用协议不经意的转发指令集 (POF-FIS) [14]，[30]对数据包解析和转发进行处理。以前，我们设计并实现了几个网络元素，子系统和系统[31] - [32] [33]来构建支持POF的网络环境。这些研究表明，POF的协议无关特性可以完美地满足WiNV的要求，因为不需要为IEEE 802.11帧定义新的匹配字段。因此，在这项工作中，我们扩展了在[22]中开发的基于POF的移动管理系统，将无线资源隔离和基于NFV的MEC添加到用于实现ADE² WiNFV的全局图中。

B. 网络功能虚拟化

传统上，服务提供商依靠专用中间盒来实现网络功能。然而，该方案具有成本效益低，上市时间长，难以维护等缺点。因此，提出NFV将网络功能与专用硬件分离，并通过利用软件定义元件实现网络功能。IT资源虚拟化[34]。具体而言，NFV使服务提供商能够在通用硬件上按需实例化vNF，以实现定制流量处理[35]，[36]。实例化vNF的直观方法是在云系统中部署普通虚拟机 (VM) [37]。然而，这样的VM通常消耗相对大的IT资源，并且可能难以适应轻量级MEC系统的资源预算。更重要的是，由于创建和迁移VM都会导致长延迟（即大约几十秒甚至几分钟），因此基于VM的方案很难支持移动客户端。另一方面，ClickOS [38]被认为是vNF原型的轻量级和快速启动平台。具体来说，通过使用高性能I/O库作为Netmap [39]，人们可以快速创建具有ClickOS的轻量级VM，并以相对较高的吞吐量在其中移动数据包。

像docker这样的基于容器的平台最近引起了广泛的兴趣，被认为是vNF原型设计的一种有前途的解决方案[20]。这是因为与VM相比，容器消耗的IT资源要少得多，并且可以在一秒钟内启动。具体来说，容器不需要包含自己的操作系统 (OS)，而是依赖其主机的OS内核提供的名称空间和资源隔离来封装vNF [40]。换句话说，对于容器，vNF基本上被定义为配置文件，可以轻松地复制，修改和传输。在这项工作中，我们利用基于容器的NFV将每个vNF打包为docker镜像，以实现快速部署和移动支持。

C. 移动边缘计算

最近，MEC被认为在接入网络中提供移动和云计算功能，以简化核心网络操作并减少端到端延迟[20]。由于服务提供商需要为不同的移动客户端和服务定制计算能力以适应他们的需求，因此IT资源虚拟化成为MEC的关键使能技术，以减轻由于硬件，功能和平台异构性带来的负面影响[41]。因此，基于NFV的MEC将是一种很有前途的解决方案，可以提高服务部署的灵活性并提高网络边缘的资源利用率。例如，Fajardo 等人。[42]利用基于NFV的MEC来提高内容交付的效率。然而，这项工作仅解决了如何使用基于NFV的MEC提高网络服务的效率和性能，但没有考虑

不同服务之间的资源分配和隔离，即WiNV和基于NFV的MEC的编排。在这项工作中，我们设计并实现了ADE² WiNFV，它可以与基于NFV的MEC协调软件定义的WiNV，以在异构有线/无线网络上实现应用驱动的

端到端切片。据我们所知，这在文献中尚未被探索过。

第三节

系统设计与实现

在本节中，我们首先对提出的ADE² WiNFV系统进行高级概述，然后详细说明系统中四层的设计。

A. ADE² WiNFV的架构概述

借助ADE² WiNFV，我们的目标是集成软件定义的WiNV和基于NFV的MEC，以在异构有线/无线网络上实现应用驱动的端到端切片。这里，应用驱动的E2E切片是指虚拟网络（VNT），其不仅包含保证的E2E带宽资源（即，以虚拟链路，虚拟交换机和虚拟AP（vAP）的形式），还包含隔离的IT资源（即，以vNF的形式）承载具有QoS保证的特定应用（例如，大数据相关应用的高吞吐量，以及延迟敏感应用的低延迟）。图2显示了ADE² WiNFV的架构，其中有四层，如下所示。

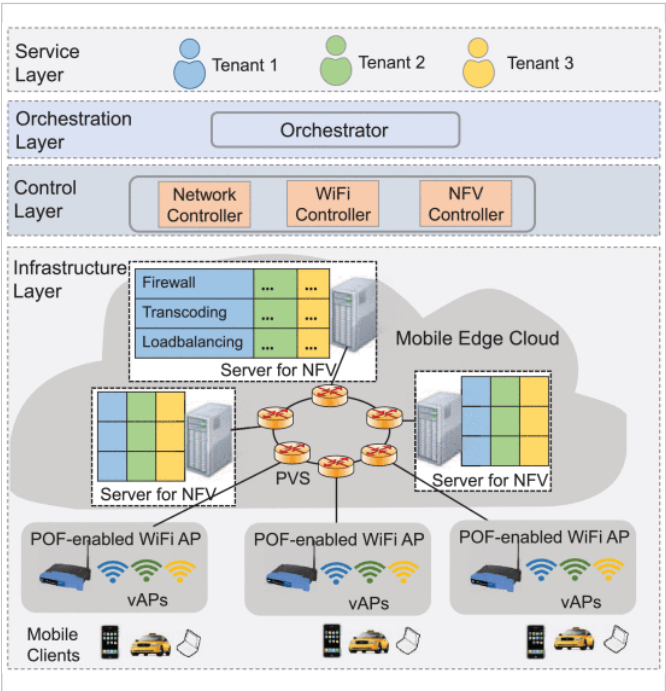


图2. 我们提出的ADE² WiNFV系统的架构。

1) 基础设施层

该层是由少数边缘网络设备（例如，WiFi AP和移动客户端）和移动边缘云组成的基板基础设施。AP是自制的，支持POF，可以提供数据平面可编程性，如有线POF交换机[29]，[33]。此外，我们对每个AP进行编程以启用WiNV，即，能够创建和托管具有隔离虚拟接口和访问带宽的vAP。换句话说，每个vAP作为专用于应用驱动的E2E切片的独立AP工作，并且使用POF-FIS处理去往/来自其的流量，以确保切片中的移动客户端的定制转发。移动边缘云覆盖了基板基础设施的有线部分，其中包括用于数据包转发的高吞吐量自制POF交换机（即PVS [33]）和用于基于容器的vNF部署的高性能Linux服务器。这里，用于防火墙，代码转换，负载均衡等的vNF可以根据应用需求动态地在服务器上实例化和从服务器中移除。

2) 控制层

该层负责基础设施层中设备的NC&M，具有三个控制器，即网络控制器，WiFi控制器和NFV控制器。网络控制器管理基板基础设施中的网络的有线部分，其包括PVS'和启用POF的AP的以太网侧，以为每个E2E切片提供定制的分组处理和转发。启用POF的AP的WiFi侧由WiFi控制器管理，WiFi控制器负责配置与无线信道，SSID，BSSID，客户端认证等相关的系统参数。同时，为了实现WiNV，WiFi控制器还控制vAP的创建和移除以及相关的接入带宽分配和隔离。NFV控制器使用移动边缘云中的IT资源处理每个E2E切片的vNF部署。

3) 编排层

该层与控制层交互以收集关于衬底基础设施的实时信息。同时，该层还为上层服务层中的租户提供一组应用程序编程接口（API），用于实例化/删除vAP和vNF，定制流量转发方案，以及监控其E2E切片的操作状态。

4) 服务层

该层是租户访问ADE² WiNFV以请求应用程序驱动的E2E切片的地方。请注意，此层仅负责租户的高级管理任务，而实际的E2E切片由业务流程和控制层完成。

B. 软件定义的无线网络虚拟化

WiFi的媒体访问控制（MAC）层可以在逻辑上划分为两个子层，即上层和下层。上层处理管理帧，包括信标，探测，认证和关联请求以及相应的响应，而下层处理控制帧，包括确认（ACK），请求发送（RTS）和清除发送（CTS）帧。注意，由于控制帧的处理是延迟敏感的，因此通常在硬件中处理下层。另一方面，管理框架可以由软件工具处理，因为它们没有时间限制。这实际上为我们提供了一个为ADE²设计软件定义的WiNV系统的好机会WiNFV。启用POF的AP的详细设计如图3所示。我们在其中集成了三个模块，即WiNV模块，WiFi代理和POF交换机。启用POF的AP在Linux系统上运行，因此可以在具有WiFi卡的商用服务器或运行OpenWrt的便携式无线路由器上实现。

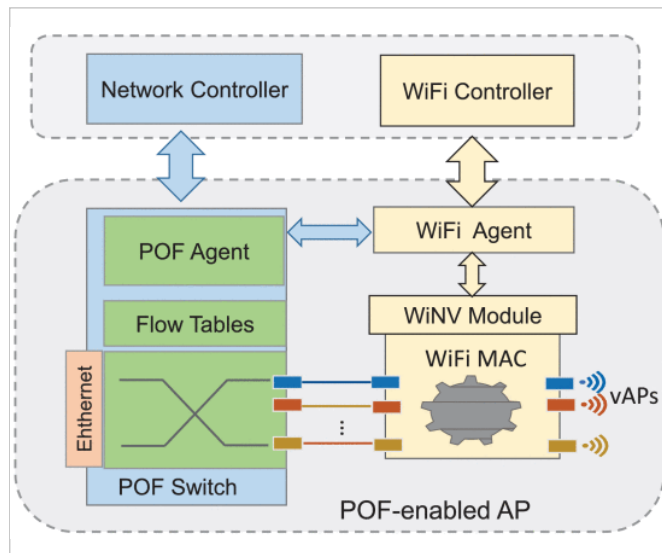


图3。
设计支持POF的WiFi AP。

1) WiNV模块

在启用POF的WiFi AP中，WiNV模块使用隔离的虚拟接口和访问带宽来处理vAP的创建和删除。我们通过扩展Hostapd [43]来实现它，这是一个在Linux系统上运行的用户空间守护进程，用于创建AP和相关的身份验证服务器。具体来说，Hostapd可以截取WiFi的MAC层的管理帧，并以自定义的方式处理它们。为了在ADE² WiNFV中支持按需应用驱动的端到端切片，我们扩展了Hostapd，以支持在物理无线接口上动态创建和删除多个vAP。此外，我们在Hostapd上编程接口以促进与WiFi代理的通信，即，报告移动客户端与WiFi代理的关联和接收指令的关联和解关联。

2) WiFi代理

我们将WiFi代理编程为轻量级Python守护程序，以桥接启用POF的AP与控制层中的WiFi控制器之间的通信。当移动客户端连接到切片中的vAP时，WiNV模块将关联事件报告给WiFi代理，WiFi代理又向远程WiFi控制器通知该事件。同样，当移动客户端离开时，也会报告解除关联事件。以这种方式，WiFi控制器实时地了解每个移动客户端的位置和状态。为了对应用驱动的E2E切片进行操作，WiFi代理接收指令（例如，从WiFi控制器创建/删除vAP，更改频道和删除客户端，并通过调用WiNV模块提供的API来执行它们。同时，执行结果也被发送回WiFi控制器。必要时，WiFi代理可以将新添加的vAP连接到POF交换机并通过它激活数据传输。

3) POF开关

POF交换机基于我们自制的软件交换机PVS [33]实现，并且它在支持POF的AP的WiFi和有线以太网接口之间桥接数据流量，因为WiNV模块仅处理

WiFi MAC层的管理帧。通过POF-FIS，控制层中的网络控制器可以在POF交换机中安装流表，实现WiFi与有线以太网接口之间的协议转换，实现基于每个流和每个vAP的流量转向。例如，POF交换机可以利用POF-FIS中的仪表指令限制任何vAP的接入带宽，从而实现对启用POF的AP上的vAP的带宽分配和隔离。

由于WiFi MAC层的管理帧是在WiFi代理中本地处理的，因此我们设计的支持POF的WiFi AP并不像[26]那样完全解耦控制和数据平面。这是因为将管理帧发送到远程控制器进行处理会带来额外的延迟，因此可能会限制移动性管理的性能。

C. 基于NFV的移动边缘云

ADE² WiNFV利用基于NFV的移动边缘云将计算和存储功能带到移动客户端附近，以提高在E2E切片中运行的应用程序的QoS。图4显示了移动边缘云中的MEC节点的设计，其由码头集装箱，MEC代理和POF交换机组成。

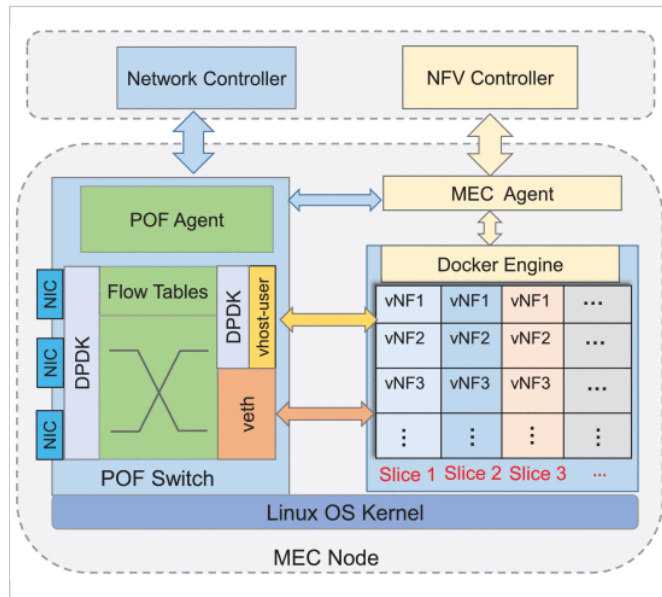


图4。
移动边缘云中MEC节点的设计。

1) Docker容器

它们在Linux系统上运行并共享操作系统的内核，因此它们可以立即启动，只消耗少量的IT资源。因此，我们使用docker容器作为我们的vNF部署平台，并将vNF打包为docker镜像。此实现为我们提供了两种实现与常用软件工具（vNFs的灵活性，例如，*iptables*的防火墙，和*HAProxy*的负载均衡）或英特尔数据平面开发套件的援助方案我们自己vNFs（DPDK）[44]。对于前一种情况，vNF通过虚拟以太网端口连接到POF交换机。对于后一种情况，vNF通过DPDK的vhost用户驱动程序与POF交换机通信，以实现高性能I/O。由于MEC节点可以托管属于不同E2E切片的多个vNF，我们使用双字节`tenant_id`来标识切片，使用另一个2字节`instance_id`来索引切片内的vNF。的`tenant_id`和`INSTANCE_ID`可以组合为一个四字节`vnf_id`，这是一种电压Vnf的唯一ID。为了通过vNFs来引导交通，我们重用`vnf_id`每个VNF作为其输入接口的IP地址。

2) MEC代理

它是一个python守护程序，负责启动，维护和停止vNF。当坐在服务层中的租户请求新的vNF时，业务流程层与NFV控制器一起工作以找到最合适的用于vNF部署的MEC节点，然后他们指示MEC节点中的MEC代理实例化vNF。接下来，MEC代理为vNF选择正确的映像并使用它来启动容器，并在容器完成启动时激活vNF的处理管道。之后，MEC代理为容器创建I/O接口并将它们连接到POF交换机。同时，MEC剂分配`tenant_id`和`INSTANCE_ID`到Vnf，组合它们以获取IP地址（即，在vnf的输入接口的`vnf_id`），并将vNF的信息记录在其数据库中。当VNF需要被移除时，MEC剂查找其数据库找到`CONTAINER_ID`的电压Vnf的，删除对应的容器，然后将删除被连接到POF开关VNF的I/O接口。需要注意的是，MEC代理还需要定期向NFV控制器报告其MEC节点上vNF的工作状态和资源使用情况。

3) POF开关

图4中的POF交换机负责在外部（即，往/返其他MEC节点）路由流量，并在本地vNF内部引导流量。为了处理与其他MEC节点之间的流量，POF交换机在物理线卡（NIC）上使用DPDK来实现高吞吐量数据包转发，而对于内部流量路由，它使用虚拟以太网端口或DPDK的vhost用户驱动程序。

D.控制器和协调器

如图2所示，在ADE² WiNFV 的控制和编排层中有三个控制器，即网络控制器，WiFi控制器，NFV控制器和协调器。我们基于ONOS平台实现所有这些[45]。通过利用我们之前在[17]和[18]中的工作，我们扩展了ONOS以支持POF并将其用作网络控制器，而WiFi控制器，NFV控制器和协调器则被编程为扩展ONOS中的应用程序。协调器可以协调三个控制器，并为服务层中的租户提供一组restful API，用于应用程序驱动的E2E切片。表格1列出北向API（即，从服务层中的租户到协调器），租户可以使用这些API动态创建/删除E2E切片并在切片中启动/停止vAP和vNF。WiFi和NFV控制器使用TCP连接分别与表2中的南向API与WiFi代理和NFV代理通信。

表1 用于调用Orchestrator的服务层的北向API

Call Orchestrator	Descriptions
<i>addTenant()</i>	Create an E2E slice
<i>getTenants()</i>	Get a global view of all the tenants' slices
<i>removeTenant()</i>	Destroy an E2E slice
<i>addVapToTenant()</i>	Add a vAP to a slice
<i>removeVap()</i>	Remove a vAP from a slice
<i>getVaps()</i>	Get status of all the vAPs in a slice
<i>addVnfToTenant()</i>	Add a vNF to a slice
<i>removeVnf()</i>	Remove a vNF from a slice
<i>getVnfs()</i>	Get all the vNFs in a slice
<i>getWifiAgents()</i>	Get all the WiFi agents in the infrastructure layer
<i>getMecAgents()</i>	Get all the MEC agents in the mobile edge cloud
<i>getClients()</i>	Get all the mobile clients in a slice

表2 控制层到呼叫基础设施层的南向API

Call WiFi Agent	Descriptions
<i>createVap()</i>	Create a vAP in a physical AP
<i>delVap()</i>	Remove a vAP in a physical AP
<i>getVaps()</i>	Get all the vAPs in a physical AP
<i>getStatus()</i>	Get radio information of a physical AP
<i>changeChannel()</i>	Change a physical AP's channel
<i>getClient()</i>	Get information of a mobile client
<i>removeClient()</i>	Disassociate a mobile client from a vAP
<i>getTxRate()</i>	Get sending rate of a vAP
<i>getRxRate()</i>	Get receiving rate of a vAP
Call MEC Agent	Descriptions
<i>createVnf()</i>	Create a vNF in an MEC node
<i>delVnf()</i>	Remove a vNF in an MEC node
<i>getVnfs()</i>	Get all the vNFs in an MEC node
<i>getStatistics()</i>	Get IT usage in an MEC node

在本节中，我们将讨论用于评估我们提出的ADE² WiNFV性能的实验演示，其设置如图5所示。在这里，我们在设置中包含五个Linux服务器，每个服务器配备一个2.10GHz Intel Xeon CPU和32 GB DDR3内存。在这些服务器中，有三个用作MEC节点，每个节点配备六个以太网端口（1GbE或10GbE），一个运行ONOS以承载服务，编排和控制层为ADE² WiNFV，最后一个配备WiFi卡作为启用POF的AP（图5中的AP2）工作。为了证明我们设计的兼容性，我们实现了另一个支持POF的AP（图5中的AP1）在运行OpenWrt的便携式无线路由器上。

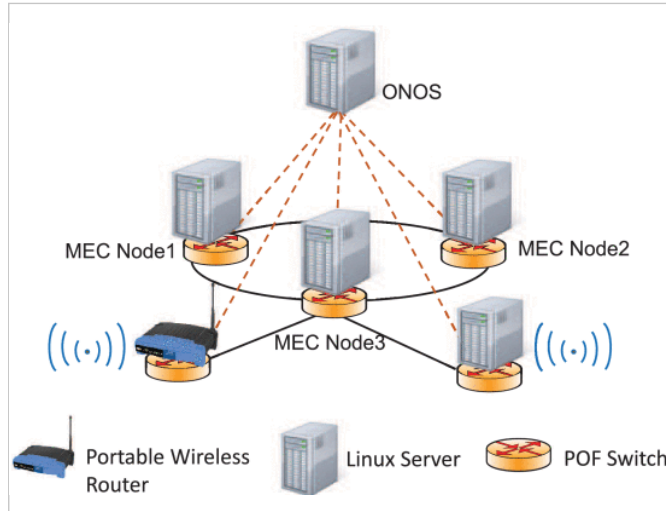


图5.
实验设置。

A. 基于容器的VNF的性能

我们首先进行实验来测量基于容器的NFV平台的性能。在这里，我们构建了一个基于ClickOS的NFV平台作为基准，因为根据[38]和[39]，ClickOS还为vNF原型提供了一个轻量级的快速启动平台，可以实现高吞吐量的流量处理。实验比较了两种NFV平台的流量处理性能。

为了将平台推向极端，我们使用它们来实现一个简单的vNF，它可以直接将数据包从输入转发到输出而无需进一步处理。然后，在单个MEC节点中，我们可以多次连接这样的vNF以实现服务功能链（SFC）。为了公平比较，基于容器和基于ClickOS的NFV平台在具有相同软件/硬件配置的相同Linux系统上运行。我们使用iperf3 [46]作为流量生成器来泵送流量通过具有1500字节固定数据包的SFC，并且实验测量流量处理吞吐量，流量处理延迟和SFC在其链长度变化时的内存使用情况。图6（a）显示流量处理吞吐量的结果。可以看出，当SFC中只有一个vNF时，我们的基于容器的NFV平台实现了1.95 Gbps的峰值吞吐量。正如预期的那样，吞吐量随着SFC的链长而减小，但是即使在SFC中有多达20个vNF，我们基于容器的NFV平台的吞吐量仍然保持在531 Mbps。相比之下，基于ClickOS的产品只能实现1.14 Gbps的峰值吞吐量，并且在SFC中使用20个vNF，其吞吐量可快速降至70 Mbps。

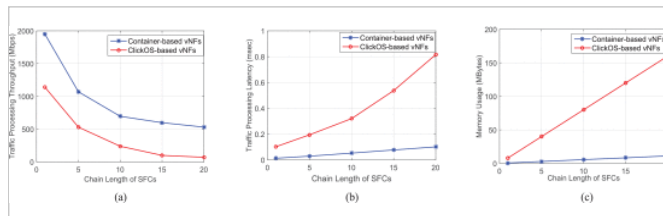


图6.
基于容器和基于ClickOS的NFV平台之间的性能比较。(a) 流量处理吞吐量。(b) 平均流量处理延迟。(c) 内存使用情况。

平均流量处理延迟的结果绘制在图6（b）中，这是通过使用ping程序获得的。结果表明，基于容器的NFV平台的流量处理延迟也比基于ClickOS的

流量处理延迟短得多。内存使用情况的比较如图6（c）所示。由于基于ClickOS的NFV平台仍然基于VM（图5），每个vNF基于消耗大约8 MB内存的VM，因此其内存使用量随着SFC的链长度而急剧增加。另一方面，

由于我们的docker容器与主机的Linux OS共享内存，因此其内存使用量仅随链长略有增加而且要小得多。结果见图6确认我们的基于容器的NFV平台比基准测试表现更好。这是因为基于容器的vNF直接处理Linux内核中的数据而没有额外的内存副本。在ClickOS中，vNF基于VM，因此数据包必须首先通过虚拟化层，然后从内核空间复制到用户空间，这会产生严格的性能瓶颈。

注意，图6中的结果是在不应用任何用于加速的高性能I/O工具的情况下获得的。实际上，使用这些工具可以进一步提高基于容器和基于ClickOS的NFV平台的流量处理吞吐量。因此，我们将netmap整合到基于ClickOS的平台中，并在基于容器的平台中添加DPDK支持，以加速其数据包处理。然后，我们使用SFC中的一个vNF重新测量其数据包处理吞吐量，并将结果绘制在图7中。实验考虑不同的分组大小，即64到1500字节。我们观察到我们的基于容器的平台实现了具有最小数据包大小的每秒766万包（Mpps）的吞吐量（即，64字节），当数据包大小为256字节时，其数据吞吐量达到10GbE端口的线速率。尽管如此，基于ClickOS的基准测试的数据包处理吞吐量仅为5.12 Mpps，64字节数据包，并且在数据包大小增加到1024字节之前无法达到10 Gbps线速。

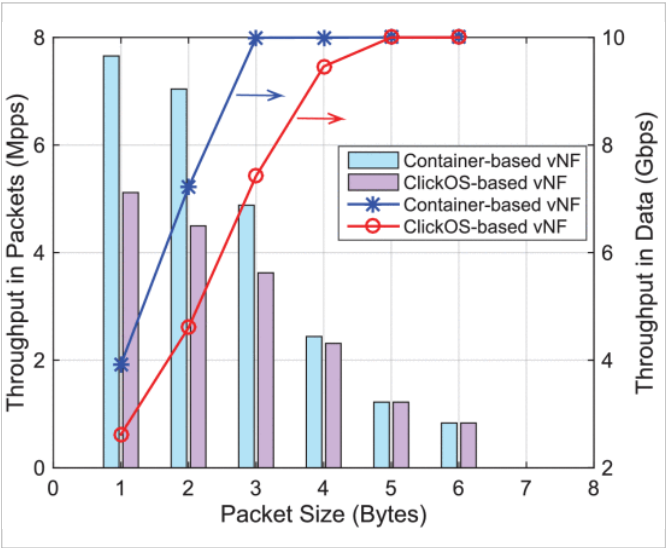
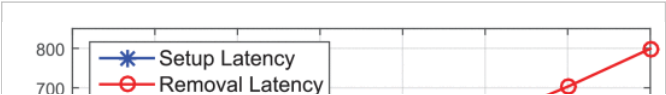


图7。
使用加速工具处理吞吐量的数据包。

B. 设置和删除延迟

正如我们之前所解释的，vAP和vNF的设置和删除延迟会影响ADE² WiNFV在动态切片和移动性管理方面的性能。因此，我们通过图5中的设置进行实验以测量延迟。这里，我们有两个物理AP，即AP1和AP2，由于它们的硬件限制，AP2可以支持8个vAP，而AP1最多只能支持4个vAP。我们测量AP2上的延迟，因为它具有更大的容量，并使用orchestrator上的restful API向AP2上的WiFi代理发送创建和删除vAP的指令。相应的建立/移除等待时间被定义为从WiFi代理接收指令到已经启动/移除vAP的时间间隔。图8显示了对不同数量的vAP进行操作的建立/删除延迟的结果，这表明平均而言，我们的ADE² WiNFV分别仅消耗大约30和100毫秒来创建和移除vAP。



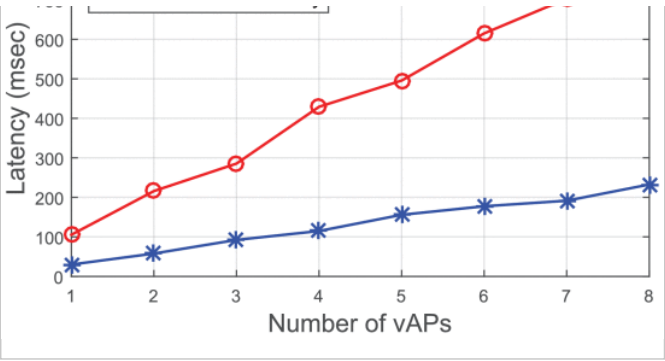


图8。
ADE² WiNFV 中vAP的设置和删除延迟。

然后，实验还测量了vNF的设置和删除延迟，我们仍然使用基于ClickOS的平台作为基准。vNF的建立/删除延迟的定义与vAP的定义相似。结果显示在图9中，我们可以看到基于ClickOS的平台实际上实现了比基于容器的平台更短的设置/删除延迟，尽管流量处理的性能更差。我们基于容器的平台的每个vNF的平均设置和移除延迟分别为0.95和0.73秒，仍然不到一秒，可以很好地满足动态操作的要求。

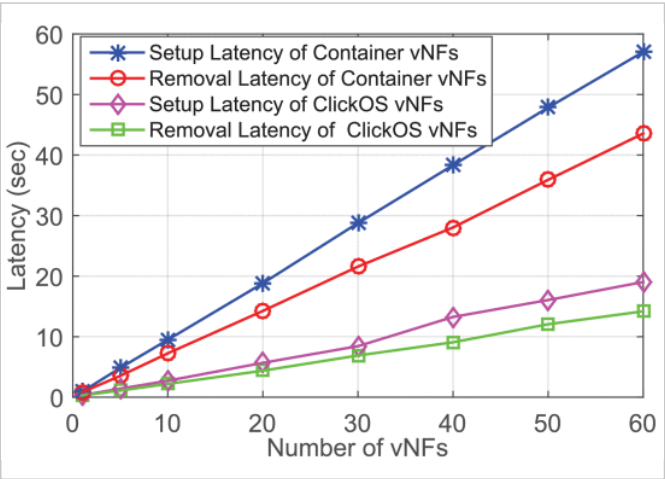


图9。
vNF的设置和删除延迟。

C.应用驱动的E2E切片演示

由于移动客户端连接到WiFi网络共享用于数据传输的无线媒体，因此难以确保对它们的QoS保证，尤其是对于诸如视频流的带宽需求高的应用。尽管IEEE 802.11e已经包括WiFi多媒体方案以改善WiFi网络中的多媒体相关应用的QoS，但是它需要在移动客户端上应用修改并且将具有兼容性问题。在本小节中，我们将进行实验以验证ADE² WiNFV可以通过软件定义的WiNV和基于NFV的MEC的编排来实现应用感知切片并实现具有QoS保证的应用，而无需在移动客户端上进行任何修改。

实验考虑了三种情况，如图10所示。在场景1中，我们不创建任何应用程序感知切片，只是让三个移动客户端保持在相同的WiFi物理网络（即由AP1托管）并相互竞争访问带宽。如图10（a）所示，ADE² WiNFV分别在MEC Node1和MEC Node2上部署用于web服务器的vNF和用于视频流服务器的vNF。在场景2中，我们在AP1上创建两个具有两个vAP的应用程序感知切片。这里，如图10（b）所示，Slice1用于Web应用程序，它是延迟容忍的，但只允许少量数据包丢失，而Slice2用于视频流，这是一个对延迟敏感的应用程序，需要保证访问带宽。图10（c）中的场景3考虑了Slice2中移动客户端的动态加入，并且为了适应由于新客户端而增加的带宽需求，ADE² WiNFV立即部署vNF用于MEC Node3上的转码以用于视频流量适配。



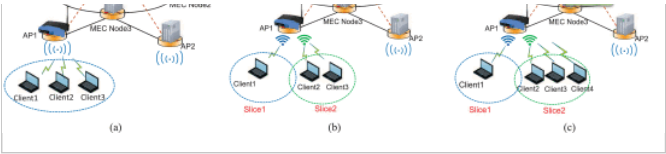


图10。
用于演示应用驱动的E2E切片的实验场景。(a) 场景1。(b) 场景2：使用应用程序感知切片。(c) 场景3：具有动态vNF部署的应用程序感知切片。

在实验中，我们测量AP1的总下行链路和上行链路带宽，并分别确认它们分别为60和30 Mbps。然后， Client2和Client3订阅MEC Node2上的视频服务器以获取1080P视频流服务，并且每个服务在AP1上消耗10Mbps的访问带宽。在视频流服务运行25秒后， Client1开始从MEC Node1上的Web服务器下载10个同时线程的大型数据文件。在场景1中， ADE² WiNFV不会创建任何片段，并允许移动客户端自由地竞争AP1上的接入带宽，而在场景2中，它创建两个片段，将Client1分配给Slice1以用于Web服务，并将Client2和Client3放入Slice2用于视频流服务。Slice2获得30 Mbps的保证访问带宽。图11显示了两种情况下在三个移动客户端上运行的服务的接收带宽。正如我们在图11 (a) 中所看到的，当没有应用程序驱动的E2E切片时，当Client1开始其下载过程时， Client2和Client3的接收带宽可以轻松降至几乎为零。 $t = 25$ 秒并占用AP1上的所有接入带宽。相反，图11 (b) 中的结果表明，在场景2中， ADE² WiNFV 提供的应用驱动的E2E分片可以保证即使在Client1的下载开始时Slice2中的Client2和Client3的接收带宽。具体来说， Client1的访问带宽限制在30 Mbps以下，因此不会影响Client2和Client3的视频流服务。

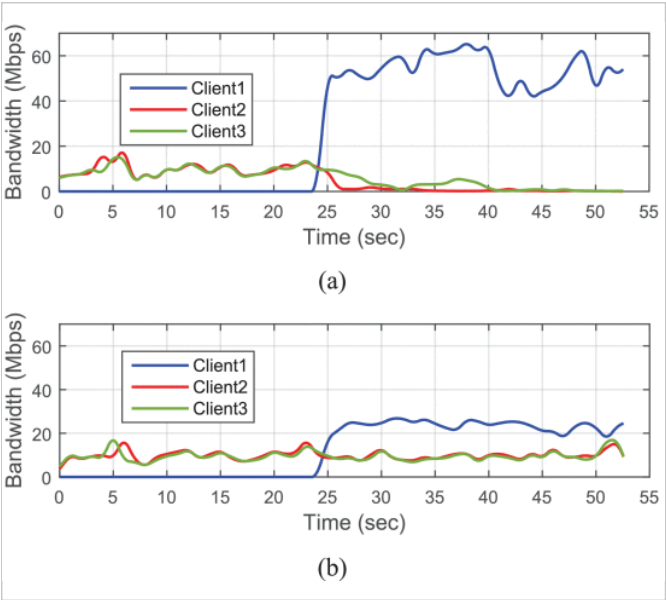


图11。
在方案1和2中接收客户端上的带宽。

为了进一步验证视频流服务的QoS，我们测量了场景1和2中Client2和Client3上视频播放的亮度分量峰值信噪比（Y-PSNR），并绘制了图12中的结果。。我们观察到在场景1中，当Client1开始下载时， Client2和Client3上的视频播放的QoS急剧下降 $t = 25$ 秒。另一方面，场景2中的应用程序驱动的E2E切片始终将视频回放的Y-PSNR维持在相对较高的值。



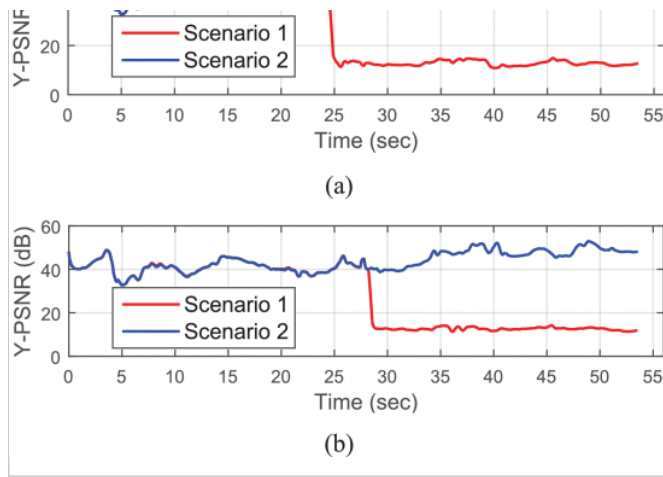


图12。
Client2和Client3上的视频播放的Y-PSNR。(a) Client2上视频播放的Y-PSNR。(b) Client3上视频播放的Y-PSNR。

在图10(c)的场景3中,我们考虑Client4动态加入Slice2并尝试与Client2和Client3共享访问带宽的情况。然而,这将导致Slice2中的带宽不足。为了解决这个问题, ADE² WiNFV部署了一个vNF, 用于按需在Slif2上对MEC Node3进行转码, 从而将每个视频流的带宽降低到8 Mbps。图13(a)示出了当没有用于代码转换的vNF时, Slice2中的三个客户端上的接收带宽。可以看出, 如果没有用于转码的vNF, 客户端上的带宽变化会相互影响, 因为在Client4加入后, Slice2中的总带宽使用率接近其上限。例如, $t = 15$ 至 $t = 22$ Client2的带宽有一个峰值, 它抑制了Client3和Client4的带宽。利用用于转码的vNF, 图13(b)中的接收带宽不再具有问题。实际上, 这可以通过图14中的客户端上的视频回放的Y-PSNR进一步验证。具体来说, 结果表明, 使用vNF进行转码时, 视频播放的Y-PSNR对所有客户端始终保持相对较高的值, 而不存在用于转码的vNF, 每个客户端的Y-PSNR可能突然发生由于客户之间的带宽竞争导致大幅下降。因此, 方案3确认了我们的ADE² WiNFV可以协调软件定义的WiNV和基于NFV的MEC, 实现流量适应, 提高移动客户端的QoS, 特别是当WiFi接入带宽成为服务提供的瓶颈时。

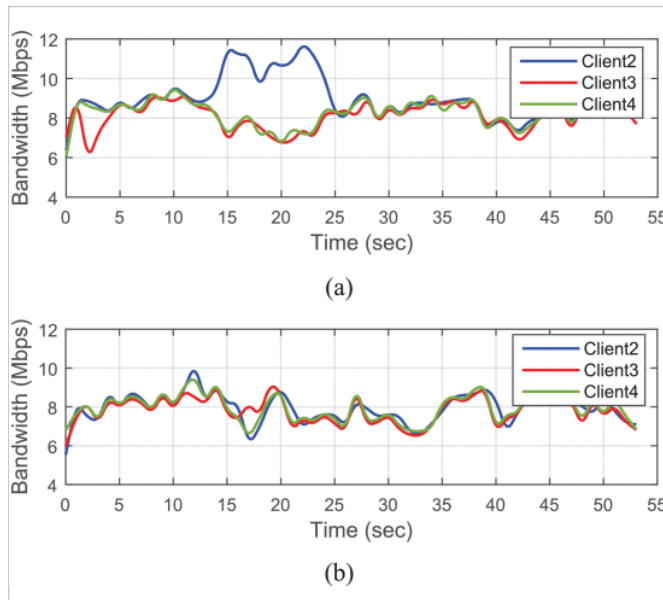


图13。
在场景3中接收客户端上的带宽。(a) 没有vNF进行转码。(b) 使用vNF进行转码。



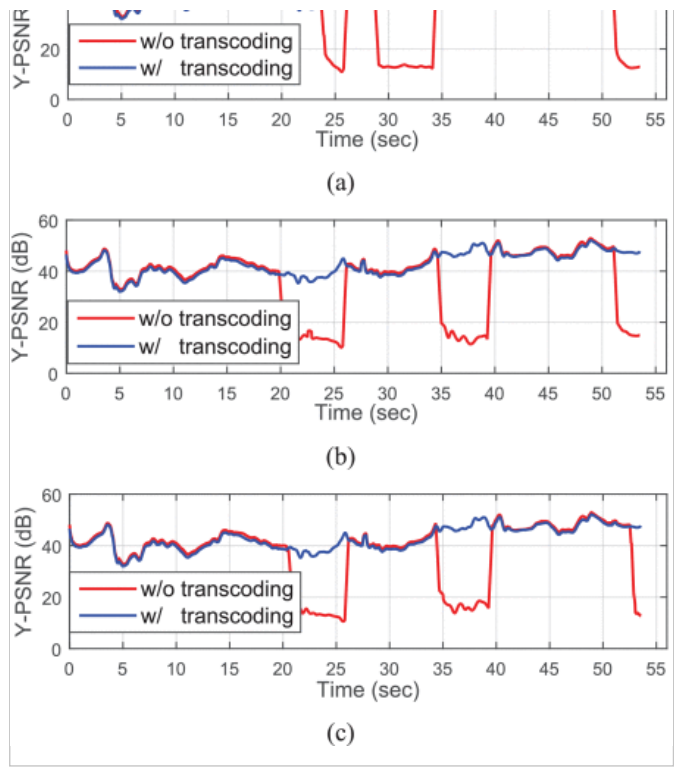


图14。
方案3中客户端上的视频播放的Y-PSNR。(a) Client2。(b) 客户3。(c) 客户4。

最后，我们希望指出与[22]中的初步系统相同，我们的ADE² WiNFV还支持NFV辅助移动性管理，并且可以实现相对较短的切换延迟。但是，由于这部分已在[22]中进行了深入讨论，因此我们在本文中省略了它。

第五节 结论

在这项工作中，我们设计并演示了ADE² WiNFV，即一种新型网络系统，可以利用基于NFV的MEC协调软件定义的WiNV，实现异构有线/无线网络上的应用驱动的端到端切片。我们的实验结果证实，ADE² WiNFV可以按需实现应用感知E2E切片，每个切片不仅包含保证的E2E带宽资源（即，以虚拟链路，虚拟交换机和vAP的形式），还包含隔离的IT资源（即，以vNF的形式）以承载具有QoS保证的应用程序。

作者	▼
数据	▼
参考	^

引文图

1. 思科视觉网络指数：全球移动数据流量预测更新2016-2021，美国加利福尼亚州圣何塞，[在线]可用：<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/视觉联网指数-VNI/移动-白-纸c11-520862.html>。
显示上下文 Google学术搜索

2. 2014年基础设施报告：Ofcom对英国通信基础设施的第二次全面分析，2018年4月，[在线]可用：
<http://stakeholderss.ofcom.org.uk/binaries/research/infrastructure/2014/infrastructure-14.pdf>。
显示上下文 Google学术搜索

3. P. Lu, Q. Sun, K. Wu, Z. Zhu, “利润驱动多媒体云计算的分布式在线混合

云管理” , *IEEE Trans. 多媒体*, 第一卷 17, pp.1297-1308, 2015年8月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (2547KB) [Google学术搜索](#)

4. N. Xue , X. Chen , S. Li , L. Gong , D. Hu , Z. Zhu , “用于自适应SVC视频多播的OpenFlow控制网络编排的演示” , *IEEE Trans. 多媒体*, 第一卷 17, 不. 9, pp.1617-1629, 2015年9月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (1963KB) [Google学术搜索](#)

5. J. Yao , P. Lu , L. Gong , Z. Zhu , “在地理分布式光学数据中心网络中进行快速协调的数据备份” , *J. Lightw. TECHNOL.*, 第一卷 33, 不. 14, pp.3005-3015, Jul. 2015。
[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

6. Z. Zhu , B. Kong , J. Yin , S. Zhao , S. Li , “建立租户要求: 按需应用驱动的vSD-EON切片” , *J. Opt. COMMUN. 网络*, 第一卷 10, pp.A206-A215, 2018年2月。
[显示上下文](#) [CrossRef](#) [谷歌学术](#)

7. *5G白皮书*, 2015, [在线]可用:
https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf.
[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

8. L. Gong , Z. Zhu , “弹性光网络上的虚拟光网络嵌入 (VONE)” , *J. Lightw. TECHNOL.*, 第一卷 32, 不. 3, pp.450-460, 2014年2月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (2502KB) [Google学术搜索](#)

9. H. Jiang , Y. Wang , L. Gong , Z. Zhu , “可用性感知的可存活虚拟网络嵌入光学数据中心网络” , *J. Opt. COMMUN. 网络*, 第一卷 7, pp.1160-1171, 2015年12月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (602KB) [Google学术搜索](#)

10. L. Gong , H. Jiang , Y. Wang , Z. Zhu , “新的位置受限的虚拟网络嵌入LC-VNE算法, 用于集成节点和链路映射” , *IEEE/ACM Trans. 网络*, 第一卷 24, 不. 6, pp.3648-3661, 2016年12月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (2598KB) [Google学术搜索](#)

11. D. Kreutz , F. Ramos , P. Verissimo , C. E. Rothenberg , S. Azodolmolky , S. Uhlig , “Software-defined networking: A comprehensive survey” , *Proc. IEEE*, vol. 103, 不. 1, pp.14-76, 2015年1月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (14201KB) [Google学术搜索](#)

12. Z. Zhu等人, “在开放流控制的多域和多国SD-EON测试平台中展示合作资源分配” , *J. Lightw. TECHNOL.*, 第一卷 33, 不. 8, pp.1508-1514, 2015年4月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (1069KB) [Google学术搜索](#)

13. X. Chen , S. Zhu , L. Jiang , Z. Zhu , “关于弹性光网络中频谱有效失效独立路径保护p循环设计” , *J. Lightw. TECHNOL.*, 第一卷 33, pp.3719-3729, 2015年9月。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (1497KB) [Google学术搜索](#)

14. S. Li等人, “Protocol oblivious forwarding (POF): 具有增强可编程性的软件定义网络” , *IEEE Netw.*, 第一卷 31, 不. 2, pp.58-66, 3月/4月. 2017年。
[显示上下文](#) [查看文章](#) 全文: PDF (364KB) [Google学术搜索](#)

15. A. Al-Shabibi , M. De Leenheer , M. Gerola , A. Koshibe , W. Snow , G. Parulkar , “OpenVirteX : A Network hypervisor” , *Proc. ONS* , 第25-30页, 2014年8月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

16. XX Jin , J. Gossels , J. Rexford , D. Walker , “CoVisor : 用于软件定义网络的组合管理程序” , *Proc. 第12届USENIX Symp. 网络. SYST. 设计实施. (NSDI)* , 第87-101页, 2015年5月。

显示上下文 Google学术搜索

17. S.Li等人 , “SR-PVX : 基于源路由的网络虚拟化管理程序, 以在vSDN中实现POF-FIS可编程性” , *IEEE Access* , vol. 5 , pp.7659-7666,2017。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (5366KB) Google学术搜索

18. H. Huang等人 , “利用分布式网络管理程序系统实现高度可用的可扩展和协议无关的vSDN切片” , *IEEE Access* , vol. 6 , pp.13513-13522,2018。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (5988KB) Google学术搜索

19. J. Liu , W. Lu , F. Zhou , P. Lu , Z. Zhu , “关于动态服务功能链部署和重新调整” , *IEEE Trans. 网络. 服务管理.* , 第一卷 14 , 没有. 3 , pp.543-553 , 2017年9月。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (866KB) Google学术搜索

20. R. Cziva , DP Pezaros , “集装箱网络功能 : 将NFV带入网络边缘” , *IEEE Commun. MAG.* , 第一卷 55 , 不. 6 , pp.24-31 , 2017年6月。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (360KB) Google学术搜索

21. M. Richart , J. Baliosian , J. Serrat , J.-L. Gorricho , “虚拟无线网络中的资源切片 : 一项调查” , *IEEE Trans. 网络. SERV. 管理.* , 第一卷 13 , 不. 3 , pp.462-476 , 2016年9月。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (799KB) Google学术搜索

22. K. Han等人 , “利用协议不经意转发 (POF) 实现NFV辅助移动性管理” , *PROC. GLOBECOM* , 第1-6页, 2017年12月。

显示上下文 查看文章 全文 : PDF (429KB) Google学术搜索

23. *OpenFlow交换机规范* , 2018年4月, [在线]可用 :
<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.0.noipr.PDF>。

显示上下文 Google学术搜索

24. A. Patro , S. Banerjee , “COAP : 通过开放API进行家庭WLAN管理的软件定义方法” , *Proc. MobiArch* , 第31-36页, 2014年9月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

25. J. Lee等人 , “meSDN : SDN的移动扩展” , *Proc. MCS* , 第7-14页, 2014年6月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

26. L. Suresh , J. Schulz-Zander , R. Merz , A. Feldmann , T. Vazao , “迈向可编程企业WLANS with Odin” , *Proc. HotSDN* , 第115-120页, 2012年8月。

在ACM上 显示上下文 访问 谷歌学术

27. J. Schulz-Zander , C. Mayer , B. Ciobotaru , S. Schmid , A. Feldmann , “OpenSDWN : 对家庭和企业WiFi的程序化控制” *Proc. SOSR*

Commun., OpenSD-WAN: 开放网络正片SDN网络互连互连, IEEE. COMM., 2015年6月。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

28. P.包西蒙等人, “P4: 编程协议无关的分组处理器”, *SIGCOMM COMPUT. COMMUN. Rev.*, vol. 44, pp.87-95, 2014年7月。

[在ACM上](#) [显示上下文](#) [访问](#) [谷歌学术](#)

29. S. Li等人, “使用协议不经意的源路由提高SDN可扩展性: 系统级研究”, *IEEE Trans. 网络. SERV. MANAG.*, 第一卷 15, 不. 1, pp.275-288, 2018年3月。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (2344KB) [Google学术搜索](#)

30. D. Hu, S. Li, H. Huang, W. Fang, Z. Zhu, “灵活流汇聚: 关于协议遗忘转发 (POF) 的转发平面可编程性的系统案例研究”, *IEEE Access*, vol. 4, pp.4707-4719,2016。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (12121KB) [Google学术搜索](#)

31. S. Li, D. Hu, W. Fang, Z. Zhu, “使用协议不经意转发 (POF) 的源路由, 以实现有效的电子卫生数据传输”, *Proc. ICC*, 第1-6页, 2016年5月。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

32. D. Hu等人, “设计和演示基于SDN的灵活流融合协议 - 不经意转发 (POF) ”, *Proc. GLOBECOM*, 第1-6页, 2015年12月。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

33. Q. Sun, Y. Xue, S. Li, Z. Zhu, “设计和演示高吞吐量协议不经意的数据包转发以支持软件定义的车载网络”, *IEEE Access*, vol. 5, pp.24004-24011,2017。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (6522KB) [Google学术搜索](#)

34. M. Chiosi等, 网络功能虚拟化, 2012, [在线]可用: https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

35. W. Fang, M. Zeng, X. Liu, W. Lu, Z. Zhu, “用于数据中心间弹性光网络中高效vNF服务链的联合频谱和IT资源分配”, *IEEE Commun. 快报.*, 第一卷 20, 不. 8, pp.1539-1542, 2016年8月。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (587KB) [Google学术搜索](#)

36. M. Zeng, W. Fang, Z. Zhu, “在DC间弹性光网络中编排树型VNF转发图”, *J. Lightw. TECHNOL.*, 第一卷 34, 不. 14, pp.3330 - 3341, 2016年7月。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (2539KB) [Google学术搜索](#)

37. J. Soares, M. Dias, J. Carapinha, B. Parreira, S. Sargento, “Cloud4NFV: 虚拟网络功能平台”, *Proc. IEEE 3rd Int. CONF. 云网. (CloudNet)*, 第288-293页, 2014年10月。

[显示上下文](#) [查看文章](#) [全文: PDF](#) (1308KB) [Google学术搜索](#)

38. J. Martins等人, “ClickOS和网络功能虚拟化的艺术”, *Proc. NSDI*, 第459-473页, 2014年4月。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

39. L. Rizzo, “Netmap: 一种新的快速数据包I/O框架”, *Proc. USENIX ATC*, 第9页, 2012年6月。

[显示上下文](#) [Google学术搜索](#)

40. J. Fontenla-Gonzalez等人, “基于轻量级容器的OpenEPC部署及其评估” , *Proc. NetSoft*, 第435-440页, 2016年6月。
显示上下文 查看文章 全文 : PDF (1299KB) Google学术搜索

41. Z. Sanaei , S. Abolfazli , A. Gani , R. Buyya , “移动云计算的异质性：分类和开放的挑战” , *IEEE Commun. 调查结果.* , 第一卷 16 , 不. 1 , pp.369-392 , 第1季脱。2014年
显示上下文 查看文章 全文 : PDF (3638KB) Google学术搜索

42. J. Fajardo , I. Taboada , F. Liberal , “通过多层移动边缘适应提高内容交付效率” , *IEEE Netw.* , 第一卷 29 , 不. 6 , pp.40-46 , Nov. / Dec. 2015年
显示上下文 查看文章 全文 : PDF (245KB) Google学术搜索

43. *Hostapd* , 2018年4月, [在线]可用 : [http : //w1.fi/hostapd/](http://w1.fi/hostapd/).
显示上下文 Google学术搜索

44. *DPDK : 数据平面开发工具包* , 2018年4月, [在线]可用 : [https : //dpdk.org/](https://dpdk.org/).
显示上下文 Google学术搜索

45. *ONOS* , 2018年4月, [在线]可用 : [https : //onosproject.org/](https://onosproject.org/).
显示上下文 Google学术搜索

46. *IPERF* , 2018年4月, [在线]可用 : [https : //iperf.fr/](https://iperf.fr/).
显示上下文 Google学术搜索

引文	▼
关键词	▼
度量	▼

IEEE帐户	▼
档案信息	▼
购买细节	▼
需要帮忙？	▼
其他	▼

A not-for-profit organization, IEEE is the world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity.
© Copyright 2019 IEEE - All rights reserved. Use of this web site signifies your agreement to the terms and conditions.
US & Canada: +1 800 678 4333
Worldwide: +1 732 981 0060

IEEE帐户	购买细节	档案信息	需要帮忙？
» 更改用户名/密码	» 付款方式	» 通讯首选项	» 美国和加拿大：+1 800 678 4333
» 更新地址	» 订单历史	» 职业与教育	» 全球：+1 732 981 0060
	» 查看购买的文档	» 技术兴趣	» 联系与支持

关于IEEE Xplore | 联系我们 | 救命 | 无障碍 | 使用条款 | 非歧视政策 | 网站地图 | 隐私和选择退出Cookie

作为一个非营利组织, IEEE是世界上最大的技术专业组织, 致力于为人民的利益推进技术。
©版权所有2019 IEEE - 保留所有权利。使用本网站即表示您同意这些条款和条件。