



## 软件定义无线网络研究进展

徐 川,马宏宝,赵国锋,唐 红,任壮祖

(重庆邮电大学 未来网络研究中心,重庆 400065)

**摘 要:** 软件定义思想在无线领域的应用促使了软件定义无线网络(software defined wireless networking, SDWN)的兴起,SDWN 分离无线控制平面及数据平面,开放无线网络可编程接口,简化了网络管理,是第五代移动通信网络(5G)的重要发展方向之一。从软件定义无线网络诞生发展入手,总结了 SDWN 的网络体系结构;阐述了主要关键技术的研究进展,包括移动管理、密集部署、负载均衡等;讨论了 SDWN 在不同场景下的应用部署,并对未来研究工作所面临的挑战及发展趋势进行了分析。

**关键词:** 软件定义无线网络(SDWN);无线局域网(WLAN);软件定义网络(SDN)

中图分类号:TN915

文献标识码:A

文章编号:1673-825X(2015)04-0453-07

## Advances on software-defined wireless networking

XU Chuan, MA hongbao, ZHAO guofeng, TANG hong, REN Zhuangzu

(Future Network Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P.R. China)

**Abstract:** The application of SDN in wireless network promotes the rises of software-defined wireless networking. SDWN decouples wireless data plane and control plane, opens up wireless network programmable interface, simplifies network management, and becomes one direction of 5G developments. First, we introduce the background and development of SDWN, and summarize the academic architectures. Then key technologies such as mobility management, dense deployment, and load balancing are given in detail. Moreover, the implements of SDWN in different scenes are analyzed. The challenges and trends are summarized in the end.

**Key words:** software-defined wireless networking(SDWN); wireless local area networks(WLAN); software-defined networking(SDN)

## 0 引 言

过去几十年中,无线通信的迅速发展极大地改变了人们的生活。基于 IEEE 802.11 的无线局域网(wireless local area networks, WLAN)从第 1 个标准发布到现在,网络传输速率增长了 3 个数量级。人们对于无线通信各方面的需求呈爆炸式增长,这将

推动 WLAN 的持续发展。随着 WLAN 传输速率的不断增长,使得物理转发设备需要支持快速的帧处理。同时,在当前密集的网络部署情况下,存在较高运营成本。

为减少成本,运营者可以在一个物理网络上虚拟出多个虚拟网络,实现网络硬件资源的有效利用。因此,产业界需要一个新的无线管理架构,它使

收稿日期:2015-02-18 修订日期:2015-06-12 通讯作者:徐 川 xuchuan@cqupt.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61402065);江苏省未来网络创新研究院‘未来网络前瞻性研究项目’(BY2013095-2-03;BY2013095-5-07)

**Foundation Items:** The National Nature Science Foundation of China(61402065); The Jiangsu Future Networks Innovation Institute ‘Prospective Research Project on Future Networks’(BY2013095-2-03, BY2013095-5-07)

得网络应用能够被独立地部署,同时支持虚拟化及数据的高速率处理<sup>[1]</sup>。

软件定义网络 (software-defined networking, SDN) 是一个新型的网络体系结构,在控制平面中,集中式网络控制器负责将数据转发平面上的流量分配给网络元件,实现拓扑感知、路由决策等功能<sup>[2]</sup>。针对目前 WLAN 面临的较低的资源利用率、难以支持网络创新等难题<sup>[3]</sup>,研究者将 SDN 核心思想引入其中,软件定义无线网络 (software-defined wireless networking, SDWN) 应运而生,成为近年来的研究热点。

## 1 SDWN 体系结构

近年来,研究者们对 SDWN 的关键技术与应用场景开展了研究,提出了针对各自不同的需求的 SDWN 系统架构及解决方案。文献 [4] 提出基于低速率的个人无线局域网的网络架构,物理设备包含微控制器部分,支持灵活的转发规则。文献 [5-6] 将数据平面扩展至多种无线移动网络,控制平面获取更新全网信息并向服务提供商提供开放接口,接入平面完成用户自由接入。文献 [7] 指出位于 SDN 控制器上的无线资源管理模块接入多种无线网络,实现无线资源集中性分配。文献 [8] 通过网络完全虚拟化,完成无线服务的接入、认证、关联等。

根据上述研究,本文总结了 SDWN 网络架构如图 1 所示。该架构分为 3 个层面:数据平面、控制平面及应用平面。其中,南向接口协议(如 OpenFlow<sup>[9]</sup>)连接数据及控制平面,而北向接口协议连接控制及应用平面。

### 1.1 数据平面

数据平面分为 3 个部分:核心网、承载网及接入网。个人、家庭及企业通过多种方式接入,满足客户群多样化需求。承载网完成多种无线业务智能承载并接入核心网,核心网由可编程的交换机和路由器接入互联网,满足网络可管理、可维护、可运营需求。

### 1.2 控制平面

控制平面由多个分布式的 SDN 控制器组成,进行流表管理、无线资源管理及全局信息控制。通过南向接口协议获取全网的网络拓扑信息,控制器执行全网信息管理。通过控制平面提供的开放应用编程接口,服务提供商可完成多种应用需求,包括负载均衡、移动管理等。

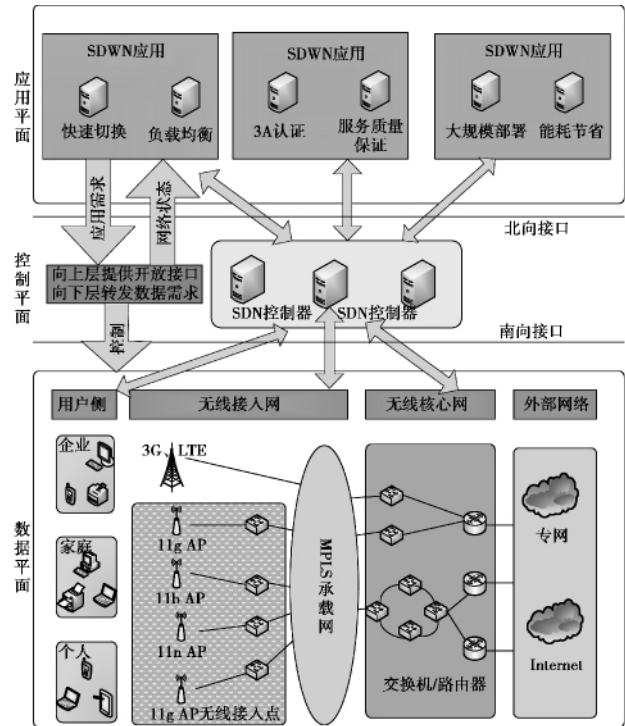


图 1 SDWN 框架

Fig. 1 SDWN architecture

### 1.3 应用平面

应用平面完成多种应用部署。服务提供商通过抽象的网络视图,进行应用开发,实现多种应用需求,解决网络可编程性。

南向接口连接数据平面及控制平面。用户侧上,用户通过多种移动节点接入网络,南向接口提供移动节点上的可编程能力,可以被用来帮助改善移动性体验。对于无线接入部分,该接口允许对无线接入网络进行有效虚拟化,因此,不同的运营商可以利用相同的物理资源,提高了资源利用率;对于核心网络部分,SDN 控制器收集必要信息,根据不同的网络请求,执行不同的行为策略。由于 SDN 提供的逻辑集中性,因此,网络链路的容量利用率可以达到最高。

北向接口连接控制平面及数据平面。通过给予运营商不同颗粒度的访问权限,允许运营商对流进行处理,即实现对数据流操作。通过全局的网络视图使得实时的网络配置成为可能,并可以动态应对网络变化。同时该接口为服务提供商提供便利,通过获取的资源抽象视图,完成编写网络应用功能。

控制与数据分离,开放可编程性的 SDWN 架构给终端用户、网络提供商、服务提供商带来部署的灵活性和可扩展性。对于终端用户来说,SDWN 通过

选择最合适转发数据路径,实现用户接入网络需求。网络提供商通过控制平面获取更新全网信息,执行全网的信息控制。服务提供商通过开放的网络接口提供多种定制化服务需求,并保证一定的服务质量。

## 2 关键技术

### 2.1 移动性管理

移动性管理是无线通信中的重要问题。终端节点在 WLAN 中移动时,其位置是不断改变的。若终端从一个接入点移动至另一接入点,就带来无线过程中的切换问题。根据 802.11 协议,终端在迁移过程需要经历扫描、认证、重关联阶段,该阶段会产生较大的网络延时<sup>[10]</sup>。因此,如何在移动性过程中保持良好的服务质量,维持用户体验,是 SDWN 需要解决的问题之一。

**Odin<sup>[11]</sup>** 架构解决终端切换问题。当物理设备接入无线接入点 (access point, AP),主控制器在该物理 AP 上创建一个虚拟 AP 与其关联。当用户进行切换时,主控制器迁移该虚拟 AP 至另一物理 AP 上完成切换目的;文献 [12] 目标是解决接入网络中 VoIP 及流媒体的切换。实验中部署的接入点 AP 包含虚拟 AP 的 A 接口及测量终端信号强度的 P 接口,当 AP2 的 P 接口检测到移动终端的信号强度大于 AP1 的 A 接口信号强度及阈值之和时,控制器将虚拟 AP 从 AP1 复制到 AP2,同时从 AP1 上删除虚拟 AP 副本,完成切换过程;文献 [13] 提出终端在移动时,移动节点实时虚拟化接入节点,用户选择最优接入点,完成移动过程;文献 [14] 提出终端在移动过程中,监控代理收集信息转发至控制器,控制器在网关及交换机上安装转发规则,实现另一关联设备与终端关联,完成移动性过程。文献 [15] 将某一范围内所有物理 AP 抽象为一个巨型 AP。控制器提供虚拟 AP 管理及南向接口管理模块,当终端进行切换时,改变与其关联的虚拟 AP,并更新节点转发规则,实现无缝移动。

上述方法利用虚拟化接入点完成终端的移动,其过程如图 2 所示,SDN 控制器控制拓扑信息,物理 AP 进行虚拟化以完成虚拟 AP 与终端关联。

当终端移动至另一物理 AP 覆盖范围,控制器进行虚拟 AP 的迁移,完成移动性过程。文献 [16-19] 通过不同方法在物理 AP 实现虚拟化功能。因此,SDWN 中移动性管理方向需要研究的内容包括:无线接入点的虚拟化方法及快速无缝切换问题。

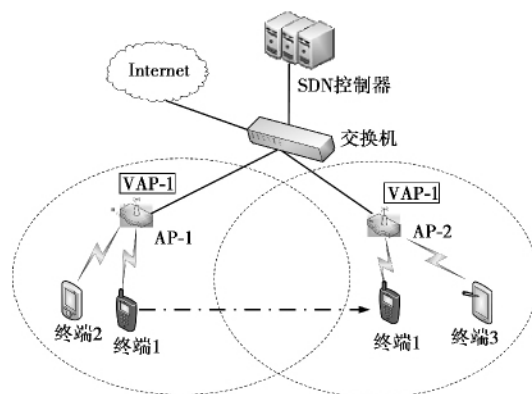


图2 虚拟化 AP 移动性过程

Fig.2 Virtual AP handoff process

### 2.2 密集部署

无线链路的信道容量取决于 2 个因素:信号信噪比和信道带宽。因此,可以利用更宽的信道带宽与更快的调制方式加快传输速率。然而,更宽信道使得长距离的传输变得困难,更快的调制方式使信号易受干扰。因此,提高信息传输速率的办法是在大覆盖范围内密集部署 AP。

**BeHop<sup>[20]</sup>** 提供密集无线部署实验床,它承载真实用户流量并运行网络应用,实现用户自由切换于多种网络之间。通过为不同网络节点设置白黑名单,控制不同终端接入。OpenRoads<sup>[21]</sup> 提供开放无线部署平台。流表层通过 OpenFlow 协议进行流表管理,FlowVisor<sup>[22]</sup> 进行网络切片实现网络虚拟化平台,控制层利用 NOX<sup>[23]</sup> 控制器获取全网拓扑及状态。部署 85 个无线 AP 及 2 个 WiMAX 基站,允许用户在 WiFi 及 WiMAX 间的自由切换。每个用户可进行独立的移动性管理实验而相互不干扰。文献 [24] 提供家庭无线 AP 配置部署方案。无线接入点及控制器组成该无线架构,控制器指示参与接入的 AP 完成统一部署任务。无线 AP 进行配置、故障自检及信息收集等,并将该信息提供给控制器,控制器进行更新配置。该架构减少信道竞争,实现更优的信道分配。文献 [25] 提供室内无线模拟及室外终端接入实验评估平台,以完成下一代无线网络协议及应用部署。

应对未来持续增长的数据业务需求,密集部署 AP 节点将成为 SDWN 解决方案之一。现有研究的部署方案中,AP 部署个数较少,难以承载现有真实用户流量。同时非正交信道之间易产生信道干扰,这是密集部署所需考虑的问题之一。



### 2.3 负载均衡

WLAN 中 AP 负责多个终端接入,若某 AP 承担的业务已经饱和,终端接入该 AP 以享受网络服务,那么服务质量难以保证。同时由于终端的移动性,终端在不同 AP 之间切换,易造成负载抖动,消耗网络资源。文献 [26] 利用负载感知算法解决多 AP 负载均衡问题。当负载较小的 AP 位于无线重叠区域时,主控制器利用算法迁移负载较大 AP 所关联的客户端至负载较小的 AP 上,实现多个 AP 相同的负载; Plug-n-Server<sup>[27]</sup> 旨在进行 Web 流量的负载均衡。通过获取目前网络状况包括拓扑结构、负载等信息,控制器选择合适的服务器重定向服务请求,实现控制网络中数据转发路径以减小响应时间,达到 Web 流量的均衡。

### 2.4 集中管理

WLAN 系统通常由成百上千无线 AP 组成,管理员通常使用管理系统进行管理,这些系统屏蔽了不同软硬件平台的复杂性。无线接入点控制配置协议<sup>[28]</sup> (control and provisioning of wireless access points protocol specification, CAPWAP) 实现厂商独立建设无线接入点。同时,现有 AP 需要支持网络虚拟化、漫游、服务质量、能源节省等,带来一定的 AP 复杂性。因此,简化无线管理也是软件定义无线网络目标之一。

ClouMAC<sup>[29]</sup> 架构中物理 AP 只负责转发 MAC 帧。虚拟 AP 存放在数据中心服务器上,进行 MAC 帧产生及接入认证。控制器通过 OpenFlow 配置交换机流表,该流表关联虚拟 AP 与物理 AP 的帧传输过程。关联状态的集中式存储使得仅需重新配置转发规则即可进行站点的迁移。同时仅需对 VAP 更新即可支持新链路层加密,简化配置管理。文献 [30] 提出了认证、授权及移动性管理方案。最小集中式方案是在 AP 上进行无线关联及认证,而控制器通过更新流表以更新客户端状态,缺点是集中式控制如关联拒绝、负载均衡等难以实现。方案二将认证过程放于控制器中进行,带有一定的复杂性。方案三利用控制器处理所有无线 802.11 帧,优势是控制器集中处理所有无线交互过程,包括请求、认证、关联等,却带来一定的控制器复杂性。Open-WiFi<sup>[31]</sup> 分离接入、认证及计费,用户流量被中继到专用的认证服务器上实现接入。该方案将认证及计费外包给第三方,为用户提供友好的服务接口,集中管理服务功能。文献 [32] 提出在核心网上进行统

一配置管理无线网络,控制器上实现认知算法的部署。SDWN 架构通过集中的控制平面掌握全局的信息,在控制器上进行集中性管理,简化了管理的复杂性。

## 3 SDWN 应用部署

目前针对 SDWN 的研究尚在起步阶段,仍需学术界及产业界的共同努力。在应用部署时,大部分采用集中式无线网络管理,实现不同的应用目标。

### 3.1 校园网部署

校园网内部署 SDWN,为研究者提供一个实验创新平台,完成网络控制管理。目前,多所高校都已经部署了 SDWN 网络以支持科研创新。

Resonance<sup>[33]</sup> 是在校园内部署的动态接入控制网络,使用可编程交换机在底层操作流,底层执行来自高层的安全策略及分布式监控系统,实现更细粒度的分布式安全接入。文献 [34] 提出家庭无线网络的控制管理方案,NOX 控制器使用自定义模块支持 OpenFlow 来控制流,并利用数据库提供的网络监控信息,对网络流量进行控制。在部署于釜山国立大学接入网络架构中,AP 通过其中的 OpenFlow 代理从控制器获取消息,执行客户端管理、无线信道检测及 AP 硬件控制,实现连接客户端的迁移<sup>[35]</sup>。

### 3.2 网络管理

传统大规模网络环境中存在较大数量的端到端链路,实现网络的管理具有较大难度。SDWN 集中式控制方式,用户可以通过收集路由信息实现对网络流统计,便于网络的管理。

文献 [36] 致力于解决家庭网络部署成本较高、难以管理等问题,多个服务提供商通过共享相同的基础设施,提供包括网络管理、视频流控制等服务,实现家庭网络创新,支持更多网络应用。OpenRadio<sup>[37]</sup> 讨论可编程的无线数据平面问题,它提供软件抽象层,并提供模块化的编程接口。控制平面上网络提供商通过改变流的转发规则实现数据平面转发,降低了网络配置复杂度。SoftRAN<sup>[38]</sup> 利用 SDN 的全局信息协调无线接入设备,降低了传输过程中的能耗。OpenRF<sup>[39]</sup> 利用软件定义思想,实现物理层上接入点信号强度控制,将高层服务需求转发至低层,其控制器保证接入点的传输速率及控制接口,进行网络管理。DIFANE<sup>[40]</sup> 提供分布式流管理架构,在中央设备上处理分布式规则并于快速路径上处理所有数据流,完成动态适应拓扑改变、主机移动等。

### 3.3 网络安全

SDWN 的集中式控制方式,为服务提供商提供全局的网络视图,第三方依据控制器提供信息,提供安全解决方案。由于屏蔽了物理平面的复杂性,网络安全机制可被灵活地部署于网络环境中。

文献 [41] 利用安全芯片 (trusted platform module, TPM) 进行设备登记检查,并隔离反常行为,检验接入终端的安全性。文献 [42] 建立一种新的设计标准来减少北向编程的相关安全缺陷。文献 [43] 利用 NOX 控制器模块动态监测网络中运行的策略,避免多种策略冲突。文献 [44] 将不同处理方式的数据包临时转发给控制器,保持数据包的一致性,节省交换机存储资源。

## 4 SDWN 所面临挑战及发展趋势

有关 SDWN 的研究尚在初始阶段,SDWN 技术也有待于完善。但是从整体上来看,目前的网络发展形势对于 SDWN 来说既是机遇也是挑战。

### 4.1 SDWN 面临的挑战

#### 4.1.1 可扩展性

可扩展性影响 SDWN 的进一步发展。目前的 SDWN 架构中,部分采取 OpenFlow 协议,但未形成统一的标准。同时该协议对于新技术的支撑力有限。分布式的北向接口支持新的网络应用的开发。对于不同的控制平面,研究者需要考虑兼容性问题。因此,针对 SDWN 的扩展性需要进一步探索。

#### 4.1.2 可兼容性

随着 SDWN 的持续发展,传统网络将与 SDWN 长期共存。设备生产厂商基于成本考虑,选择将相关协议切入设备之中,必然使得网络设备更加臃肿。同时与未来的互联网发展方向如主动网络<sup>[45]</sup>、信息中心网络 (information-centric networking)<sup>[46]</sup> 的融合,将成为未来发展方向之一。

#### 4.1.3 安全性

SDWN 采用集中性控制的思想,控制器统一承载无线网络中所有流,是无线网络服务的中枢机构,其安全性直接关系网络的可用性及可靠性。安全的认证机制及安全策略的制定,也将成为 SDWN 健康发展的重要保证。

### 4.2 SDWN 的发展趋势

SDWN 的提出,给 WLAN 领域带来崭新的活力。但是从技术本身来看,目前尚未有统一的标准,

虽然各个研究机构提出的架构不尽相同,但是他们在主要思想上是一致的,即实现数据平面与转发平面的分离,并开放灵活的可编程接口,实现不同无线业务需求。在未来的一段时间以内,仍然是传统的网络设备为主,其发展过程也是一个逐渐过渡融合的过程。未来的无线网络领域,用户需要更加灵活的网络接入,更加安全的网络体验,这成为 SDWN 所需要研究发展的动力。在未来的 5G 领域中,SDWN 将产生重要的影响力。

### 参考文献:

- [1] DELY P. Architectures and algorithms for future Wireless Local Areas Network [D]. Karlstad: Karlstad University, 2012.
- [2] Open Networking Foundation. Software-defined networking: The new norm for networks [EB/OL]. (2012-04-13) [2015-05-20]. <https://www.opennetworking.org>.
- [3] REDIETEABG G, CARIOUS L, CHRISTIN P, et al. Cross-layer multichannel aggregation for future WLAN systems [C]//IEEE International Conference on Communication Systems. Singapore: IEEE Press, 2010: 740-745.
- [4] CONSTANZO S, GALLUCCIO L, MORABITO G, et al. Software Defined Wireless Networks: Unbridling SDNs [C]//Software Defined Networking (EWSN), European Workshop. Darmstadt: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [5] BERNARDOS C, OLIVA A, SERRANO P. An architecture for software defined wireless networking [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 52-61.
- [6] MAO Y, YONG L, DE PENG J, et al. Software-defined and virtualized future mobile and wireless networks: a survey, mobile networks and applications [J]. Mobile Networks and Applications, 2015, 20(1): 4-48.
- [7] OpenFlow™-Enabled Mobile and Wireless Networks, ONF Solution Brief [EB/OL]. (2013-09-30) [2015-05-20]. <https://www.opennetworking.org>.
- [8] Software-Defined Wireless Networking: Concepts, Principles and Motivations [EB/OL]. (2014-05-14) [2015-05-20]. <http://static.anyfinetworks.com>.
- [9] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication, 2008, 38(2): 69-74.
- [10] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. ANSI/IEEE 802.11-2007. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) Specification [S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.

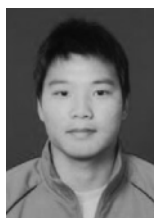
- [11] SURESH L, SCHULZ-ZANDER J, MERZ R, et al. Towards programmable enterprise wlangs with odin [C]//Proceedings of the 1st workshop on hot topics in software defined networks, HotSDN'12. New York: IEEE Press, 2012: 115-120.
- [12] JOORIS B, SCHOUTTEET A, VERMEULEN F, et al. Access Network Controlled Fast Handoff for Streaming Multimedia in WLAN. [C]//16th IST Mobile and Wireless Communications Summit. Budapest: IEEE Press, 2007: 1-5.
- [13] GUIMARAES C, CORUJO D, AGUIAR L, et al. Empowering Software Defined Wireless Networks Through Media Independent Handover Management [C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, GA: IEEE Press, 2013, 2204-2209.
- [14] DELY P, KASSLER A, BAYER N. Openflow for wireless mesh networks [C]//20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Maui, HI: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [15] ZHAO D, ZHU M, XU M. Supporting 'One Big AP' illusion in Enterprise WLAN: an SDN-based Solution [C]//IEEE Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Hefei: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [16] HAMAGUCHI T, KOMATA T, NAGAI T, et al. A Framework of Better Deployment for WLAN Access Point using Virtualization Technique [C]//IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). Perth, WA: IEEE Press, 2010: 968-973.
- [17] NAGAI T, SHIGENO H. A Framework of AP Aggregation Using Virtualization for High Density WLANs [C]//Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS). Fukuoka: IEEE Press, 2011: 350-355.
- [18] ALJABARI G, EREN E. Virtualization of wireless LAN infrastructures [C]//Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference. Prague: IEEE Press, 2011: 837-841.
- [19] SMITH G, CHATURVADI A, MISHRA A, et al. Wireless virtualization on commodity 802.11 hardware [C]//Proceedings of the second ACM international workshop on Wireless network testbeds. New York: ACM, 2007: 75-82.
- [20] YIANNIES Y, MANU B, ADAM C, et al. BeHop: A Testbed for Dense WiFi Networks [C]//Proceedings of the 9th ACM international workshop on Wireless network testbeds. New York: ACM, 2014: 1-8.
- [21] KOKIONG Y, MASAYOSHI K, ROB S, et al. OpenRoads: Empowering research in mobile networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(1): 125-126.
- [22] CASADO M, NATE F, GUHA A. Abstractions for software-defined networks [J]. Communications of the ACM, 2014, 57(10): 86-95.
- [23] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. NOX: Towards and operating system for networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(3): 105-110.
- [24] PATRO A, BANERJEE S. COAP: A software defined approach for home WLAN management through an open API [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2014, 18(3): 32-40.
- [25] RAYCHAUDHURI D, SESKAR I, OTT M, et al. Overview of the ORBIT radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols [C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA USA: IEEE Press, 2005: 1664-1669.
- [26] ANIL K, RANGISETTI B, HARDIK B, et al. Load-aware Hand-offs in Software Defined Wireless LANs [C]//IEEE 10th International Conference on wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Larnaca: IEEE Press, 2014: 685-690.
- [27] HANDIGOL N, SEETHARAMAN S, FLAJSLIK M, et al. Plug-n-Serve: Load-Balancing Web Traffic using OpenFlow [EB/OL]. [2015-02-10]. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2009/demos.php>.
- [28] The Internet Engineering Task Force(IETF). RFC 5415. Control and Provisioning of Wireless Access Points(CAPWAP) Protocol Specification [S]. USA: IETF, 2009.
- [29] JONATHAN V, PETER D, ANDREAS K, et al. Cloud-MAC-Towards Software Defined WLANs [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2012, 16(4): 42-45.
- [30] THERESA E. Authentication, Authorization and Mobility in Openflow enabled Enterprise Wireless Networks [EB/OL]. (2012-09-11) [2015-05-20]. <http://www.net.t-labs.tu-berlin.de>.
- [31] YAP K, YIAKOUIMIS Y, KOBAYASHI M, et al. Separating authentication, access and accounting: A case study with OpenWiFi [EB/OL]. (2011-01-20) [2015-05-20]. <https://www.opennetworking.org>.
- [32] SUNETH N, IJAZ A, MARKKU J, et al. SDN core for Mobility Between Cognitive Radio and 802.11 Networks [C]//Eighth International Conference on Next Generation Mobile Apps, Service and Technologies(NGMAST).

- Oxford: IEEE Press, 2014: 272-281.
- [33] NAYAK A, REIMERS A, FEAMSTER N, et al. Resonance: Dynamic Access Control for Enterprise Networks [C]//Proceedings of the 1st ACM workshop on Research on enterprise networking. New York: ACM, 2009: 11-18.
- [34] MORTIER R. Control and understanding: Owning your home network [C]//Communication Systems and Networks (COMSNETS). Bangalore: IEEE Press, 2012: 1-10.
- [35] KIM W, CHUNG SH, AHN CW, et al. Seamless Hand-off and Performance Anomaly Reduction Schemes based on OpenFlow Access Points [C]//28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). Victoria, BC: IEEE Press, 2014: 316-321.
- [36] YIANNIS Y, KIONG Y, SACHIN K, et al. Slicing home networks [C]//Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on Home networks. New York: ACM, 2011: 1-6.
- [37] BANSAL M, MEHLMAN J, KATTIS S, et al. OpenRadio: A programmable wireless dataplane [C]//Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks. New York: ACM, 2012: 109-114.
- [38] GUDIPATI A, PERRY D, LI LE, et al. SoftRAN: Software defined radio access network [C]//Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking. New York: ACM, 2013: 25-30.
- [39] KUMAR S, CIFUENTES D, GOLLAKOTA S, et al. Bringing cross-layer mimo to today's wireless lans [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 387-398.
- [40] YU M, REXFORD J, FREEDMAN M, et al. Scalable Flow-Based Networking with DIFANE [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 351-362.
- [41] ARMKNECHT F, GASMI Y, SASEGHI A. An efficient implementation of trusted channels based on OpenSSL [C]//Proceedings of the 3rd ACM workshop on Scalable trusted computing. New York: ACM, 2008: 41-50.
- [42] MANNAN M, VANRSHOT P. Reducing threats from flawed security APIs: the banking PIN case [J]. Computer & Security, 2009, 28(6): 410-420.
- [43] SON S, SHINS S, YEGNESWARAN V. Model checking invariant security properties in OpenFlow [C]//IEEE International Conference on Communication. Budapest: IEEE Press, 2013: 1974-1979.
- [44] MCGEER R. A safe, efficient update protocol for OpenFlow networks [C]//Proc of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. New York: ACM, 2012: 61-66.
- [45] TENNENHOUSE DL, WETHERALL DJ. Towards an active network architecture [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(5): 81-94.
- [46] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content [C]//Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies. New York: ACM, 2009: 1-12.

## 作者简介:



徐川(1980-),男,重庆人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为未来网络、移动互联网、网络测量。E-mail: xuchuan@cqpt.edu.cn。



马宏宝(1992-),男,安徽人,硕士研究生,主要研究方向为未来网络。E-mail: tlxy543@163.com。



赵国锋(1972-),男,陕西人,教授,博士生导师,主要研究方向为互联网技术、网络测试与测量。E-mail: zhaogf@cqpt.edu.cn。



唐红(1957-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为网络管理。E-mail: tanghong@cqpt.edu.cn。

任壮祖(1990-),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为未来网络。E-mail: rzz40951712@163.com。

(编辑:刘勇)