



综述

无线接入网络中网络功能虚拟化研究综述

贾海宇, 陈佳, 王铭鑫

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 网络功能虚拟化 (NFV) 技术是近年兴起的网络技术, 通过将具有特定网络功能的软件搭载在通用硬件服务器上, 实现软件与硬件解耦。将网络功能虚拟化技术应用到无线接入网络中, 将其部分网络功能虚拟化, 可以有效地降低网络运营成本和硬件设备制造成本, 提高网络部署的灵活性, 满足移动用户的质量体验 (QoE) 需求。为了深入了解 NFV 在无线接入网络中的发展现状与趋势, 从 3 个角度对现有研究进行综述, 包括无线接入网络中网络功能虚拟化的相关标准研究现状、无线网络功能虚拟化技术的体系架构以及无线接入网络中网络虚拟化资源分配的问题, 并提出了网络功能虚拟化在无线网络中应用存在的挑战。

关键词: 网络功能虚拟化; 资源分配; 无线接入网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019019

Survey on network function virtualization in RAN

JIA Haiyu, CHEN Jia, WANG Mingxin

School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: Network function virtualization (NFV) is a kind of new network technology rising in recent years. It realizes the decoupling of software and hardware by running the software which has specific function on a general-purpose hardware server. Applying the NFV to the radio access network could virtualize some of the radio access functions. It can reduce the operating costs and capital costs efficiently, and improve the flexibility of the network deployment. It also can satisfy the quality of experience of mobile users. In order to review the work that contribute to the current situation of NFV in radio access network, three perspectives were reviewed, including research on the related standards of network functional virtualization in RAN, network architecture of network function virtualization, and the resource allocation of network function deployment. Finally, the challenges of network function virtualization applying in wireless network were proposed.

Key words: network function virtualization, resource allocation, radio access network

收稿日期: 2018-05-26; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61471029); 中央高校基本科研业务经费专项基金资助项目 (No.W17JB00180)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61471029), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.W17JB00180)



1 引言

随着计算机网络的发展,各种新型技术日新月异,如云计算^[1]、雾计算^[2]、物联网^[3]等,随之需要新的硬件设备作为支撑。然而,传统模式下不同的硬件设备具有单一的网络功能,当新技术出现时,需要制造新的网络设备替换旧的网络设备。然而,现有的硬件设备都是专有硬件设备,硬件的研发周期很长,新技术的迭代速度快于硬件的迭代速度,增加了新技术的应用更新周期,这势必会制约新技术的发展,增加硬件设备的制造成本。此外,由于新技术的革新而废弃的旧设备的处理,也会增加环境的负担,这与现在倡导的绿色网络^[4]不符。尤其是在无线网络中,各种专用设备种类繁多,上述问题更加严重。

面对这类问题,网络功能虚拟化(NFV)^[5]技术应运而生,即在通用硬件设备平台上通过虚拟化技术实现不同的网络功能,如防火墙功能、深度分组检测(DPI)功能、服务网关(SGW)功能等。最早在2012年11月,欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)联合全球7家主流运营商,成立了标准化研究小组,从运营商角度对NFV进行研究,旨在通过软硬件解耦的方式,降低运营商的资本支出和运营成本,使网络功能部署更加灵活、方便。

在ETSI公布的网络功能虚拟化的9个用例^[6]

中,提出了移动核心网和IP多媒体子系统虚拟化、移动基站虚拟化、内容分发网络虚拟化、固定接入网络功能虚拟化等多种虚拟化方式。而在无线移动网络中,传统的无线接入节点,如eNode B、Wi-Fi AP等,都可以利用网络功能虚拟化技术,以实现高效、灵活地部署网络环境,在节约成本的同时满足移动用户的质量体验需求。

网络功能虚拟化技术通常可以和软件定义网络(SDN)^[7]、云计算等联合应用,形成新型网络结构。现有网络功能虚拟化的研究中,包括网络功能虚拟化的体系架构设计、虚拟网络功能(VNF)部署等。在不同的场景中,如无线基站场景、云媒体场景、无线mesh网络等,对网络功能虚拟化的体系结构进行设计,可以更好地适配不同的网络需求,如网络容量、时延、移动性、新业务快速部署等。而对虚拟网络功能部署的研究,可以将代表不同网络功能的VNF高效、快速、动态地映射到底层物理网络中,以实现网络服务的需求。这些网络功能包括端到端网络中的中间件(如防火墙、网络地址转换器、负载均衡器等),也包括无线网络中的基站、分组核心网(evolved packet core, EPC)中的服务网关、PDN网关(PGW)等。

现有网络功能虚拟化技术的综述从不同角度对网络功能虚拟化进行研究,见表1。参考文献[8]是一篇关于网络功能虚拟化技术在下一代

表1 现有网络功能虚拟化相关综述

参考文献	主要内容
[8]	在移动核心网中应用NFV的挑战与要求以及在EPC网络中的分组方法
[9]	从多种角度对网络功能虚拟化资源分配问题进行分类
[10]	总结了现有的参考文献中对SFC的标准和实现的研究方法
[11]	从多种角度综述SFC资源分配问题
[12]	网络功能虚拟化在多域中的管理和编排
[13]	SDN/NFV在移动核心网中的研究进展
[14]	对中间盒的网络功能虚拟化问题进行综述
[15]	对网络功能虚拟化的资源配置和优化问题进行综述
[16]	主要阐述了基于SDN/NFV的移动核心网架构

移动核心网中应用的综述, 主要介绍了 NFV 的框架, 讨论了在移动核心网中应用 NFV 的挑战和要求, 并提出了 NFV 在 EPC 实例中的分组方法。参考文献[9]是一篇关于在网络功能虚拟化技术中如何依据网络服务的需求对网络基础设施进行资源分配 (NFV-RA) 的问题的综述, 它对 NFV-RA 问题进行了详细的分类并提出了 NFV-RA 问题的主要挑战。参考文献[10]对服务功能链 (service function chain, SFC) 进行综述, 主要包括现有 SFC 架构、SFC 与 NFV 的相关性、与 SFC 体系结构相关的开放性研究课题以及 SFC 体系结构如何实现最佳性能 4 类问题。参考文献[11]对 SFC 资源分配 (service function chaining resource allocation, SFC-RA) 算法的研究现状进行了综述, 提出了 SFC-RA 问题的通用的数学模型, 并对 SFC-RA 问题进行分类, 包括基本 SFC-RA 问题、动态 SFC-RA 问题、线上 SFC-RA 问题、多提供者 SFC-RA 问题等。参考文献[12]介绍了 NFV 在多域中的管理和编排问题, 并且提出了一种多域 NFV 管理和编排问题的参考体系结构。参考文献[13]系统而全面地介绍了 SDN 和 NFV 在移动核心网中的研究, 从 4 个维度 (架构、技术、功能和部署策略) 进行分析比较。参考文献[14]主要对中间盒的网络功能虚拟化问题进行综述, 并提出了“四象限”的分类方法对现有网络功能虚拟化研究的解决方案进行分析比较, 总结其优势与开销。参考文献[15]主要对网络功能虚拟化的资源配置和优化问题进行综述, 阐述了资源配置的 3 个阶段及面临的挑战和研究方向。参考文献[16]主要阐述了 SDN 和 NFV 在移动核心网中的架构研究, 主要分为根据 SDN/NFV 重新设计核心网架构和与现有核心网兼容的网络架构。现有对网络功能虚拟化技术的综述从不同的角度进行分析和总结, 如移动核心网中、多域中的管理和编排、VNF 资源分配问题等, 然而, 上述研究

中均没有特定对无线网络中网络功能虚拟化的研究进展的综述。

本文调研和分析了近几年在移动网络的无线接入网络中, 网络功能虚拟化技术的研究进展。从 3 个角度对无线接入网络 (radio access network, RAN) 中网络功能虚拟化技术的研究现状进行了分析总结, 包括: 无线网络中网络功能虚拟化的相关标准的研究现状、无线网络功能虚拟化技术的体系架构以及无线网络中网络功能虚拟化的资源分配问题, 从不同角度对当前的研究进行了分类和比较。

2 相关技术背景

2.1 无线移动网络虚拟化

在无线接入网络中 NFV 的主要应用是虚拟化基站。ETSI 在其公布的 NFV 用例^[2]中指出, 虚拟化基站是 NFV 用例的一个方向。参考文献[17]研究了将无线基站中射频拉远头 (remote radio head, RRH) 和基带处理单元 (building baseband unit, BBU) 分离, 通过放置有效的 BBU 位置, 有效地利用网络资源, 减小时延。参考文献[18]研究了在云无线接入网中, IP 数据分组在虚拟 BBU 中的通信流程。参考文献[19]研究了 NFV 在 5G 下虚拟化的网络功能、在 5G 环境下 NFV 架构的搭建以及在协同多点 (coordinated multiple points, CoMP) 传输、设备到设备 (device to device, D2D) 通信、超质密网络中如何应用 NFV。参考文献[20]中, 利用网络功能虚拟化、软件控制分离及网络切片技术, 将频谱资源虚拟化, 并提出了一种资源分配方法, 利用神经网络算法实现网络按需定制, 满足服务质量需求。参考文献[21]对虚拟化移动基站进行分析, 介绍了基站虚拟化的目标、实现方式、技术手段以及面临的问题。

无线接入网络虚拟化的实现方式是通过将传统基站中的一部分功能虚拟化, 形成虚拟化



资源池，按需选取不同的虚拟化无线资源，形成具有无线功能的 VNF。通过虚拟化技术，将无线资源共享给多个用户使用。但是由于无线资源的特殊性，实现无线资源的虚拟化需要考虑无线资源之间的有效隔离。

与移动核心网虚拟化相比，无线网络的虚拟化资源部署更加复杂，在有线网络中，底层物理网络的通用设备所需的资源主要包括计算资源、存储资源和网络资源。而在无线网络中，由于无线网络设备种类较多、功能复杂，所需的资源也不仅包括上述 3 种资源，还需要频谱资源、时域资源等。

2.2 网络功能虚拟化技术简介

2.2.1 体系架构

由 ETSI 定义的 NFV 网络架构^[22]如图 1 所示，包括通用管理系统和业务支持系统、网络服务、网络功能虚拟化基础设施（network function virtualization infrastructure, NFVI）和网络功能虚拟化管理和编排（NFV management and orchestration, NFV-MANO）。

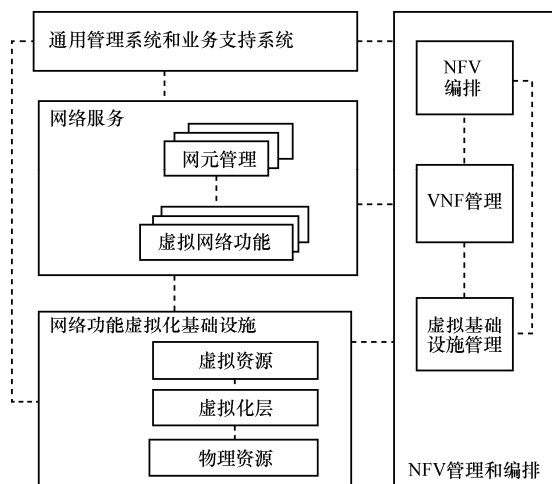


图 1 ETSI 定义的 NFV 参考架构

(1) 通用管理系统和业务支持系统

通用管理系统（operation support system, OSS）与业务支持系统（business support system, BSS）负责基础设施和虚拟网络功能的管理，与

管理和编排模块交换网络服务生命周期等信息。

(2) 网络服务

网络服务由虚拟网络功能和网元管理（element management, EM）构成。其中，VNF 表示虚拟网络功能，以取代传统网络功能。VNF 需放置在一个或多个虚拟机的操作系统上或者直接安装在硬件设备上，由本地虚拟机程序或者虚拟机监控器管理。EM 负责管理 VNF 的创建、配置和监控等。EM 与 VNF 管理交互 VNF 所需的虚拟化资源和 VNF 生命周期管理的信息。

(3) 网络功能虚拟化基础设施

网络功能虚拟化基础设施包括所有的物理和网络资源，即物理资源、虚拟资源以及虚拟化层。物理资源与虚拟资源之间通过虚拟化层连接。物理资源负责网络功能的处理、存储和连接，虚拟资源是对物理资源的抽象^[15]，虚拟化层管理物理资源，以简化软件配置过程。

(4) 网络功能虚拟化管理和编排

网络功能虚拟化管理和编排的作用是管理 NFVI、编排网络服务和 VNF 所需的资源配置。它的结构主要包括 NFV 编排、VNF 管理和虚拟基础设施管理。MANO 用于所有与 NFV 有关的必要的管理任务。NFV 编排主要通过调度 VIM 对物理资源和虚拟资源进行编排和生命周期的管理，以及服务的生命周期属性信息和数据模型的数据库。VNF 管理负责 VNF 的生命周期管理。虚拟基础设施管理负责 NFVI 的计算、存储和网络资源的控制和管理，以及虚拟资源与物理资源的关联。

2.2.2 虚拟网络功能

虚拟网络功能是 NFV 的基本元素，它表示具体的虚拟网络功能（如 PGW、无线基站、防火墙等），由一个或多个 VNF 组件构成。为实现相应的网络功能，虚拟网络功能需映射在基础设施中的通用硬件服务器上。VNF 由网元管理和 VNF 管理器管理。VNF 结构如图 2 所示，是由 ETSI 定义的^[23]，由图 2 可知，VNF 通过接口与其他元素相连。

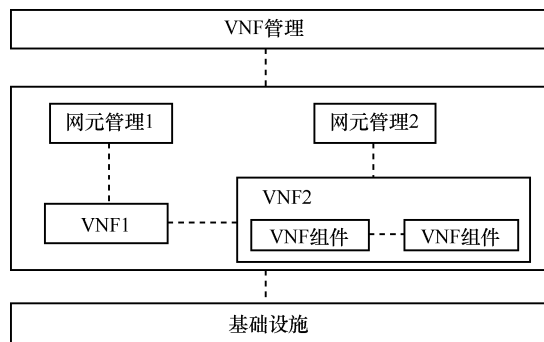


图2 VNF 结构

2.2.3 SFC

SFC^[24]是由 IETF 服务功能链工作组 (IETF SFC WG) 提出的, 它由一组有序排列的虚拟网络功能组成, 形成特定的网络服务。SFC 由 4 个逻辑块组成, 包括: 分类器、服务功能转发器 (service function forwarder, SFF)、服务功能和 SFC 代理。SFC 是基于 NFV 和 SDN 的一种新型的服务链路部署模型, 在 NFV 中可以由 NFV 转发图 (NFV-FG) 实现 SFC 功能。在 NFV 中, SFC 必须嵌入物理网络节点中。无线接入网络 SFC 如图 3 所示, 包括无线基站 (eNode B)、服务网关、分组网关、防火墙和负载均衡器。

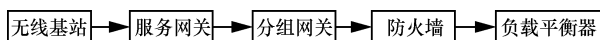


图3 无线接入网络 SFC

2.2.4 网络切片

根据下一代移动通信网络联盟 (Next Generation Mobile Networks, NGMN) 对网络切片^[25]的定义, 网络切片技术利用虚拟化将物理网络划分为独立的逻辑网络, 以实现不同的端到端网络服务的并行运行。资源共享和隔离是网络切片技术的两个特点, 共享指不同的网络切片共享同一物理网络资源, 如计算资源、存储资源、无线资源 (时域、频域、码域、空域等), 利用虚拟化技术将同一个网络资源虚拟成一个个网络切片, 以实现资源的高效利用。隔离指不同的网络切片在共享底层资源时需要实现性能隔离、安全隔离和管理隔离^[26]。NFV 和 SDN 为网络切片提供了

技术支持: 利用 NFV 技术, 可以将实现网络服务所需的网络功能软件化, 并运行在通用的服务器上, 并利用 NFV 的管理和编排, 实现网络服务的灵活部署和底层网络资源的高效利用; 利用 SDN 技术, 实现网络控制与转发分离, 为网络服务提供可靠连接, 以灵活调度网络流量。因此, 利用 NFV 和 SDN 技术, 可以促进网络切片的实现。

2.3 与移动核心网虚拟化的区别

目前, 大多数对网络功能虚拟化技术的研究都集中在核心网中, 如参考文献[27]研究了在移动核心网中 NFV 网络架构和虚拟网络功能优化部署算法。参考文献[28]研究了用户移动感知的虚拟网络功能部署算法, 在用户设备与 PGW 的最小路径和最小化 SGW 重定位的频率之间实现纳什均衡。参考文献[29]研究了在移动网络中, NFV 应对网络故障的 4 种算法。参考文献[30]研究了由服务的动态到达和离开以及虚拟网络功能的过度部署导致网络中虚拟网络功能利用率低的问题, 提出了网络功能整合问题, 允许 SFC 重构以减少虚拟网络功能的数量。参考文献[31]利用资源拆分的方法降低资源分配力度, 部署虚拟网络功能, 提高了资源利用率和租户请求接受率。参考文献[32]利用两个阶段的优化方案实现串行 SFC 的优化部署, 通过路径折返纠正机制提升链路利用率。

而无线网络的虚拟化与移动核心网的虚拟化技术稍有不同, 具体见表 2。移动核心网中, 虚拟网络功能通常表示 PGW、SGW 和防火墙等功能, 而无线接入网中一般要实现基站的虚拟化, 如 BBU 等虚拟网络功能。移动核心网中, 主要考虑的优化问题有用户和 PGW 之间最小距离、SGW 重置频率等, 而在无线网络中, 主要考虑 RRH 和 BBU 之间的时延、前/回传链路的设置成本等。在移动核心网中, 虚拟化的资源主要是计算资源、存储资源和网络资源, 而在无线网络中, 还需考虑无线资源 (如时域资源、频谱资源、功率资源)



表2 移动核心网和无线接入网中网络功能虚拟化技术的区别

区别	移动核心网	无线接入网
虚拟化网络功能不同	虚拟化网络功能主要包括：PGW、SGW、网络中间件（如防火墙）	主要针对基站功能的虚拟化（如 BBU 等）进行研究
优化的目标不同	考虑移动核心网的场景需求，如用户和 PGW 之间最小距离、SGW 重置频率等	考虑无线接入网的场景需求，如前/回传链路的设置成本、RRH 与 BBU 的时延等
提供的物理资源不同	主要包括计算资源、存储资源和网络资源	主要包括计算资源、存储资源、网络资源和无线资源（时域、频域等）
网络环境不同	相对简单	相对复杂，多种异构网络并存、信道受时间影响

以及不同的无线接口等。在移动核心网中，网络环境相对简单，而无线网络环境中，需要考虑多种接入技术、异构网络并存、无线信道受时间影响等特点。

3 无线 NFV 标准研究情况

3.1 NFV 有关的标准化组织

近年来，国内外多家标准组织都开始了对 NFV 的研究，包括 ETSI、3GPP、IETF、ITU、ONF 等。

ETSI 作为 NFV 技术的发起者，从 2012 年起就成立了专门的工作组对 NFV 进行研究，到目前，累计出版了 100 种刊物，累计发布了第 3 个版本的 NFV 白皮书以及 NFV 管理和编排、网络架构、主要概念等多种规范。对于 NFV 的研究，也从概念证明（proof of concept, PoC）发展到了详细的标准规范。

其他标准化研究组织也成立了专门的工作组，从不同的角度对网络功能虚拟化技术进行研究。国际互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force, IETF）成立了专门的 SFC 工作组和 NFV 工作组，分别研究在 NFV 中实现网络功能服务链、用户在不同功能模块间路由和网络功能虚拟化的资源管理、业务编排等问题。3GPP 有多个工作组在研究网络功能虚拟化，其中 SA5 工作组制定了不同网络（RAN、CN、IMS）及其服务的供应和管理的需求、体系结构和解决方案。国际

电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）也积极研究网络功能虚拟化技术，其 SG13 研究组主要研究了控制层面网元的虚拟化需求和架构等^[33]。中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）也积极促进 NFV 技术在国内标准化的研究，如在不同的网络场景中 NFV 的需求、功能和接口要求等。

3.2 无线虚拟化网络标准研究现状

而上述 NFV 标准化组织也积极在无线网络中研究 NFV 技术，见表 3。

其中，ETSI 中发布的标准较多，主要如下：参考文献[34]发布了关于在 NFV 环境中部署移动边缘计算的标准，主要分析了如何将移动边缘计算的参考体系结构部署在 NFV 环境中，包括移动边缘网络在 NFV 中的架构模型、将移动边缘网络的网络功能虚拟化为 VNF 实例等内容；参考文献[35]为可重新配置无线系统的安全要求的标准，主要讨论了可重构无线系统的安全需求，包括身份管理和认证、文件完整性证明和验证、配置控制服务等机制；参考文献[36]发布了在 LTE 网络中应用 NFV 实现故障管理的相关标准，包括虚拟网络功能在移动网络中的故障管理、生命周期管理的虚拟化等内容；参考文献[37]主要研究了在 NFV 架构中移动网络的配置管理；参考文献[38]发布了 NFV 在 LTE 网络中结构管理、性能管理的相关标准；参考文献[6]具体介绍了虚拟化基站的动机、主要内容、虚拟化目标及

表3 各标准组织在无线网络功能虚拟化中的进展

参考文献	标准发布单位	时间	内容
[34]	ETSI	2018年2月	移动边缘计算在NFV架构中的应用
[35]	ETSI	2018年2月	可重构无线系统安全需求
[36]	ETSI	2018年1月	故障管理在NFV架构中的应用
[37]	ETSI	2017年10月	LTE网络中配置管理在NFV中的应用
[38]	ETSI	2017年7月	LTE网络中性能管理在NFV中的应用
[6]	ETSI	2017年5月	NFV标准的第3个版本,包括虚拟化基站用例
[39]	IETF	2017年7月	SFC在雾RAN中的应用
[40]	IETF	2016年11月	移动服务提供商网络中的SFC提供了一些典型的用例
[41]	IETF	2017年8月	介绍了服务感知编排和接入网核心网的虚拟化融合
[42]	IEEE	2017年12月	规范了对不同接口的统一支持,满足共享网络控制和SDN原则
[43]	3GPP	2015年10月	移动核心网络中NFV管理功能和解决方案
[26]	NGMN	2015年2月	在移动核心网中应用NFV/SDN技术

其存在的挑战。

IETF的NFV工作组目前主要研究网络虚拟化资源的挑战、多域网络虚拟化、5G核心架构在云环境中数据模型等。SFC工作组在无线网络中研究进展主要包括SFC在雾RAN中的用例、NSH头部格式、SFC的框架等;参考文献[39]介绍了SFC在雾无线接入网中的应用;参考文献[40]阐述了SFC在移动网络中的HTTP和TCP用例。参考文献[41]提出了在5G环境中,将SFC扩展到无线接入网中。

IEEE对于网络功能虚拟化的研究,主要包括在参考文献[42]中规范了对不同接口的统一支持、实现了共享网络控制和软件定义网络原则,从而降低了新网络技术、新网络运营商和新服务提供商的障碍,有利于NFV技术的使用。

3GPP SA5工作组在参考文献[43]中提出了移动核心网络的NFV管理功能和解决方案,并且研究NFV-MANO对3GPP管理系统的潜在影响。

NGMN在参考文献[26]中提出了将NFV/SDN应用于虚拟移动核心网络、实现高效的网络管理的设想。

4 无线网络中NFV架构模型

无线网络中的NFV架构基于现有ETSI提供的网络架构,但需要适用于无线网络中,因而将基于ETSI的架构模型进行改进。现有对无线网络中NFV架构的研究中,Dalla-Costa等^[44]提出了Maestro作为NFV的调度器,Riggio等^[45]提出了EmPOWER模型,在ETSI的架构中加入了无线网络资源模块以及无线网络虚拟功能。

4.1 Maestro架构

Maestro是一个为无线网络中应用NFV技术而设计的调度器,用于解决由不同元素组成的VNF的部署和编排问题,如图4所示。在NFV环境中,网络操作人员根据OSS/BSS的访问控制规则或者运营商的特定功能需求对网络服务、功能和NFVI进行选择 and 配置,并利用管理和编排模块将SFC映射到底层物理网络资源中。Maestro中包括注册、目录、决策、指挥和监控功能。

注册: NFV-MANO需要管理和编排VNF和NFVI的物理资源,而在master的架构中,VNF的运行情况和NFVI中的可用的物理资源都由寄

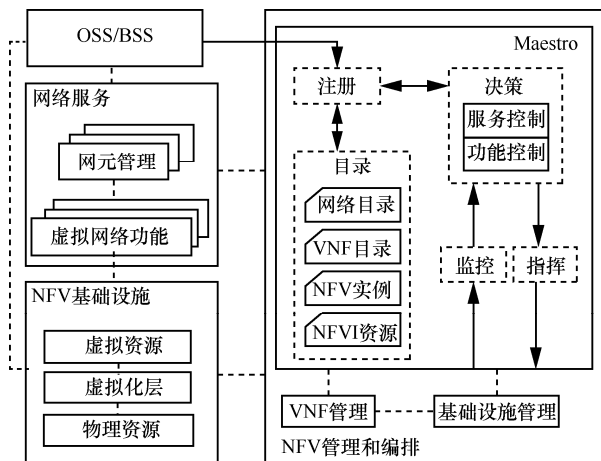


图4 Maestro 网络架构

存储器组存储。任何新的服务或 VNF 都必须在目录中注册。

目录：包括网络目录、VNF 目录、NFV 实例和 NFVI 资源，与注册模块相连。用于存储网络中可用服务、功能和资源，并将其作为当前实例的状态。

决策：决策模块是 Maestro 的核心模块，用于 VNF 部署算法的决策机制的执行，包括服务控制模块和功能控制模块。服务控制模块，用于管理 SFC 的生命周期的操作。功能控制模块用于管理 VNF 的部署。

指挥：指挥模块用于根据决策模块提出的部署方案，将其转换为配置信息并发送给 VNF 管理模块和基础设施管理模块。

监控：监控模块用于监控和收集 VNF 的操作和网络资源，并将所有的数据返回给注册模块，其运行模式有两种：一种是事件触发型，另一种是轮询事件型。

4.2 EmPOWER 架构

EmPOWER 架构如图 5 所示。EmPOWER 是一个基于 IEEE 802.11 系列无线网络标准的 NFV 虚拟化架构，主要应用于企业级网络和校园网。其结构基于 ETSI 的 NFV 结构模型，由 3 部分构成：底层是网络功能虚拟化基础设施，包括物理资源、虚拟化层和虚拟资源；中间层是 SFC，由

具有特定功能的虚拟网络功能构成；上层是 OSS/BSS，可以管理虚拟网络。这 3 层分别与管理和编排中的 3 个模块相连，负责虚拟网络功能的生命周期管理和调度。

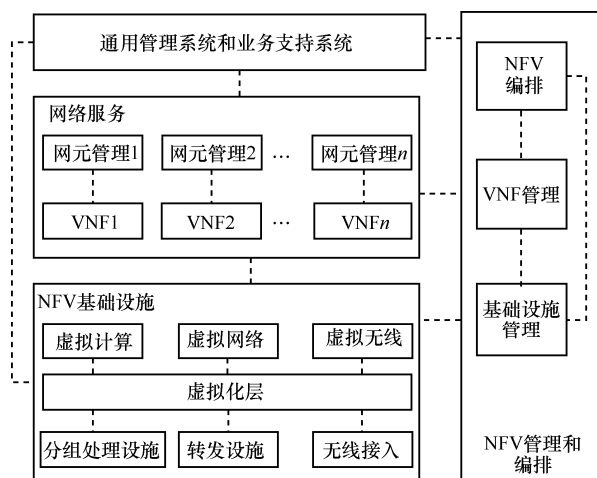


图5 EmPOWER 网络架构

EmPOWER 的 NFV 架构中，主要是针对无线功能加入 NFV 架构中的设计。首先，在 SFC 中，将虚拟网络功能分为分组转发功能、分组处理功能和无线处理功能。其中，分组转发功能（如 OpenFlow 转发器等）需要网络资源，分组处理功能（如防火墙、负载均衡器等）需要计算资源、网络资源等，无线处理功能（如 eNode B、Wi-Fi AP 等）需要底层无线资源。与分组处理功能、分组转发功能和无线功能对应，在网络功能虚拟设施（NFVI）中对虚拟资源和物理资源进行分类，分为虚拟计算资源、虚拟网络资源和虚拟无线接入网络。物理基础设施中包括分组处理设施、转发设施和无线接入设施。

4.3 两种网络架构的比较

EmPOWER 和 Maestro NFV 网络架构从不同的方面对 ETSI 的架构模型进行改进，以适应无线网络的需求。Maestro 偏重于对管理和调度模块的设计，而 EmPOWER 偏重于在网络架构中加入无线接入功能。

在 Maestro 中对管理和编排模块进行了详细

的设计,调度模块具有注册、决策、指挥和监控的功能,并且设计了目录,可以存储当前物理网络环境、服务请求以及可用资源的状态。而在 EmPOWER 网络架构中,对无线接入功能进行设计。在 SFC 中,加入了具有无线网络功能(如 eNode B、Wi-Fi AP 等)的 VNF。在 NFVI 中加入了无线接入功能所需要的资源。

5 无线网络中 NFV 资源分配问题

5.1 NFV 资源分配问题概述

NFV 资源分配也是 NFV 研究中的一个重点问题,其核心目标是将虚拟网络资源部署在通用网络设备上,从而形成一个端到端的网络服务。在 NFV 中,通过管理和编排功能收集信息整合资源,利用优化部署算法在物理资源上部署虚拟网络功能。

NFV 资源分配问题可以分为 3 个阶段^[9]。第一个阶段是 VNF 链路组成(VNF chain composition, VNF-CC)阶段,当用户申请一个网络服务时,需要由 NFV-MANO 确定这项网络服务需要哪些服务功能实现以及各个功能之间的顺序。第二个阶段是 VNF 转发图嵌入(VNF forwarding graph embedding, VNF-FGE)阶段,当确定好一条 SFC 时,需要考虑如何将 SFC 嵌入实际物理网络中。第三个阶段是 VNF 调度(VNF scheduling, VNF-SCH)阶段,即 VNF 的时间调度问题。例如,在 NFV 中,每个物理节点都可以搭载多个虚拟机,以实现不同的服务功能。此时,需要考虑在同一个物理节点中,不同的 VNF 实现的先后顺序。特别是,当一个网络中同时具有多条 SFC 时,不同的 VNF 的先后顺序会影响到网络的整体性能,比如,整体网络时延、网络利用率等。

在 NFV 资源分配问题中,通常会根据网络服务的特定需求,确定不同的资源优化目标。通常,优化目标可以分为对服务性能的优化和对网络成

本的优化。对服务性能的优化,如网络利用率、网络时延和网络带宽^[46-48]等。对网络成本的优化,如最小化网络节点数、最小化节点成本^[49-51]等。

在 NFV 资源分配问题中,目前大多数文献考虑的应用场景都是在核心网络中,很少有考虑无线接入网络的虚拟网络功能部署问题的文献。而随着物联网、云计算等技术的发展,移动终端、电子医疗穿戴设备等需要无线网络支持的应用设备越来越多。如何在无线网络中应用 NFV 技术则是亟需解决的问题。

5.2 无线网络虚拟化功能部署研究现状

在现有的研究中,对无线网络虚拟化功能部署的研究较少,主要针对无线接入网络中基站资源的虚拟化。通过无线资源的隔离和共享,以某种最优化的方式(如最小化网络时延、最小化网络成本等)实现网络功能的快速部署。无线网络虚拟化功能部署研究现状见表 4。

参考文献[52]主要研究将虚拟化资源池中的 BBU 部署到 RRH 中,以实现最小化 RRH 和 BBU 之间的时延和服务器和前/回传链路(RRH 和 BBU 之间)的设置成本。参考文献[53]研究了在无线接入网络中虚拟网络功能部署的问题,并针对网络切片中的资源隔离问题提出一种切片管理机制。参考文献[54]提出了考虑无线链路干扰的虚拟节点资源重映射算法,根据重映射影响因子,当服务请求结束时对发生变化的物理资源重新映射,以实现负载平衡。参考文献[55]研究了一种低复杂性多目标定位算法,可有效地在 3 层云运行架构的环境中嵌入具有 BBU 功能的 VNF。其提出的多目标放置算法,可以根据需求改变虚拟网络功能的嵌入条件实现多目标虚拟网络功能决策。参考文献[56]研究了在光纤无线接入网中利用 SDN 和 NFV 技术实现虚拟网络功能映射,提出了一种基于网络重构的虚拟网络嵌入算法。当网络出现故障或信道重分配时,对链路进行重新调度。参考文献[57]研究了在企业级 WLAN 下虚拟网络功



表 4 无线网络虚拟化功能部署研究现状

	参考文献	优化算法	优化目标	贡献
部署成本	[52]	BILP 启发式	最小化服务器和前/回传链路的设置成本以及每个 RRH 与指定的 BBU 之间的时延	第一篇研究 RAN 虚拟化部署的文献, 提出了一个 BILP 模型和一个启发式算法
	[53]	ILP 启发式	最小化部署成本	提出了一种新的虚拟网络功能部署算法, 创新性地包括了具有无线接入功能的虚拟网络功能, 并考虑了资源隔离
	[54]	启发式	最小化链路成本和节点成本	考虑无线网络环境下, 当网络服务请求结束后, 提出针对物理资源的重映射算法, 实现网络负载均衡
	[55]	ILP	最小化 VNF 链在物理网络上的嵌入成本	提出了一种低复杂性多目标定位算法, 可有效地在三层云运行架构的环境中嵌入 VNF 的 BBU 链
	[56]	/	虚拟网络功能部署, 满足最小化成本、最大化利润的目标	研究了无线光纤网络的 NFV 部署架构和最大化利润、最小化成本的优化模型
时延	[57]	启发式	虚拟网络功能部署, 满足应用程序级别的约束 (通常是时延)	为企业无线网络提供一个虚拟网络功能管理和编排框架, 并提出了虚拟网络功能部署算法
资源利用率	[58]	/	运载云中的平均资源利用率	提出了一种有效的载波资源分配方法, 这是无线网络虚拟化的关键问题之一。利用该算法, 可以提高载波资源利用率, 实现网络容量的动态调整
	[59]	MILP	最小化最大运载云平均利用率; 最小化占用的计算资源; 最小化违反 QoS 需求	研究了无线云网络下的网络功能虚拟化问题, 提出了部署算法在 3 个目标下的权衡

能部署, 以满足应用程序级别的约束 (如时延), 并提出了一个基于底层网络和服务请求的广度优先遍历的递归的贪婪算法。参考文献[58]提出了一种有效的载波资源分配方法, 通过使用该算法提高了载波资源利用率, 以实现网络容量的动态调整。参考文献[59]在基于边缘云和中心云的新型云架构中提出了一种虚拟网络功能优化部署算法, 并考虑了服务的质量需求 (如相应时间、实时性请求和时延等)。

5.3 无线网络虚拟化功能部署

由 ETSI 提出的虚拟化无线资源^[60]包括无线接入网络中虚拟化基站的很多功能, 如基带处理单元 (BBU) 功能、基带处理器 (baseband processor, BBP)、MAC 层控制、无线链路控制 (radio link control, RLC)、分组数据融合协议 (packet data convergence protocol, PDCP)、无线资源控制 (radio resource control, RRC)、协同多点接入 (CoMP) 技术都可以作为虚拟功能。

对于 NFV 网络功能部署的研究, 不同的参考文献都提出了基于某种特定场景的计算式。本节

基于参考文献[53]提出了在无线网络虚拟化功能部署时需要的基本参数, 见表 5。物理网络由无向图表示:

$$G_{\text{nfvi}} = (N_{\text{nfvi}}, E_{\text{nfvi}}) \quad (1)$$

其中, N_{nfvi} 表示底层物理网络节点, E_{nfvi} 表示物理网络节点之间的链路。 $\omega_s(n)$ 表示物理网络节点具有的资源, 通常包括计算资源、存储资源、网络资源和无线资源等, 依具体场景而定。 $\omega_e^s(e^{nm})$ 表示物理链路之间的带宽资源。 R_i 表示第 i 个服务请求, 一个服务由一组网络功能 F_k 组成。 F_k 表示不同的网络功能。在 NFV 中, 需要将网络服务转化成一组由虚拟网络功能组成的 SFC。虚拟网络由有向图表示:

$$G_{\text{sfc}} = (N_{\text{sfc}}, E_{\text{sfc}}) \quad (2)$$

其中, N_{sfc} 表示虚拟网络节点 (VNF), E_{sfc} 表示虚拟网络节点之间的链路。 $\omega_v(n)$ 表示虚拟网络节点请求的资源, 如计算资源、存储资源、网络资源和无线资源等。根据不同的网络功能, 请求的物理资源也不同。 $\omega_e^v(e^{nm})$ 表示虚拟链路之间的带宽资源。

表 5 无线网络虚拟化功能部署参数

参数	描述
G_{nfv}	SFC 图
N_{nfv}	在 G_{nfv} 中的物理节点
E_{nfv}	在 G_{nfv} 中的物理链路
$\omega_s(n)$	节点 n 提供的资源, $n \in N_{\text{nfv}}$
$\omega_e^s(e^m)$	链路 e^m 提供的带宽资源, $e^m \in E_{\text{nfv}}$
R_i	表示第 i 个服务请求
F_k	表示不同的网络功能, k 表示网络功能的种类
G_{sfc}	SFC 图
N_{sfc}	在 G_{sfc} 中的虚拟节点
E_{sfc}	在 G_{sfc} 中的虚拟链路
$\omega_v(n)$	节点 n 请求的资源, $n \in N_{\text{sfc}}$
$\omega_e^v(e^m)$	链路 e^m 请求的带宽资源, $e^m \in E_{\text{sfc}}$

5.4 在无线网络的优化目标和限制条件

在资源部署优化问题中, 根据不同的服务需求需要建立不同的优化目标。依据研究的优化目标不同, 可以分为两类: 一类优化目标是用于提升服务性能, 需满足服务水平协议 (service level agreement, SLA) 和服务质量需求 (quality of service, QoS), 实现将虚拟网络功能映射到实际物理网络中, 通常包括最小化时延 (如 RRH 和 BBU 之间的时延)、节点利用率、链路利用率等; 另一类优化目标是从运营商的成本收益考虑, 通常包括最小化 VNF 的搭建成本 (如前/回传链路的设置成本)、最小化网络节点数等。这两类问题相互矛盾, 通常是 NP 难问题, 需要在多个角度上进行权衡。而资源部署的限制条件中, 通常需要考虑部署限制和容量限制。部署限制, 需考虑不同的场景中对 SFC 部署的要求, 如一条 SFC 上的不同虚拟功能需部署在不同的底层物理设备上。容量限制, 考虑不同的场景中, 所需的虚拟资源与物理设备供给的资源之间的限制。

5.5 无线网络的评价指标

在无线网络虚拟化资源分配方案中, 评价指

标可以分为 3 类: 对物理资源占用情况、SFC 部署情况和优化目标的完成情况。

(1) 物理资源占用情况: 主要考虑部署多条 SFC 后, 底层物理资源的使用情况, 包括链路利用率、节点利用率、资源平均利用率等^[53,58]。

(2) SFC 部署情况: 主要考虑构造的优化算法部署 SFC 的能力, 包括 SFC 部署时间、SFC 接受率等^[55-56]。

(3) 优化目标的完成情况: 主要考虑构造的优化算法是否完成了预定的优化目标, 与具体优化目标有关, 如执行该算法后物理资源的成本、BBU 服务器的数量、QoS 违反程度、不同信道条件的部署算法收益率等^[52]。

6 网络功能虚拟化在无线网络中应用的挑战

网络功能虚拟化技术在无线网络中的应用有别于移动核心网, 在无线网络中, 因无线通信的传播特性, 对时间和空间更加敏感, 通常要求低时延和大带宽。因此, 无线网络中应用 NFV 技术面临着一些挑战, 如无线网络中对时延更加敏感、无线网络场景复杂多变、多种形式网络结构并存等。

6.1 资源管理

由于用户移动性、网络拓扑结构多变、无线网络带宽限制、上下行链路不同, 造成无线网络虚拟化资源管理更加困难, 需根据无线网络的特点制定合理的资源管理机制, 对资源进行统一的管理、调度、维护和监控^[21], 依据无线网络环境的变化对网络进行动态的调整与维护, 以满足用户的服务质量需求, 实现网络的灵活调度和负载均衡。在进行无线网络虚拟化资源管理时, 需重点考虑资源隔离、带宽限制、拓扑结构多变、映射架构等问题。

无线网络的资源隔离的实现面临巨大挑战, 如在无线蜂窝网络中的跨层干扰、同层干扰等^[61]。无线资源隔离需要保证资源隔离之后, 每部分资源能够独立满足特定的服务需求, 彼此之间不受



影响。在 5G 网络中提出了网络切片技术,是应对无线资源隔离的一个有效措施^[62]。在无线网络中,对无线频谱资源进行切片,实现灵活管理和共享。

由于无线网络频谱带宽资源的稀缺性,使资源管理更加困难,因此,需设计合理的资源分配机制,对无线带宽资源进行灵活分配和动态调整,在满足用户服务质量需求的同时,提高资源利用率,以实现无线资源的按需管理与分配。

无线网络中环境复杂、多种接入技术并存,另外,受用户移动性的影响,导致无线网络拓扑结构多变,造成了资源管理更加困难。在进行虚拟化网络功能部署时,需充分考虑无线网络拓扑的动态性,及时感知资源的变化情况。

现有资源管理映射架构可以分为集中式、分布式和集中式管理分布式控制^[63]3 类。在进行资源管理映射架构的设计时,需综合考虑无线网络的多种控制信令与接口、异构网络并存等特点。

6.2 时延

移动网络中资源监控的弹性决策^[64]、动态分配带宽^[65]、负载均衡^[66]等机制是应对网络时延问题的有效方式。而在无线网络中用户的移动性增强,无线资源还受到用户的空间位置、基站切换频率的影响^[28]。相比移动核心网络,无线网络对时延的敏感度更大,所以,在无线网络的虚拟化功能部署中,需要更多考虑如何高效、快速地部署 VNF,以及当 VNF 出现故障时,NFV 管理和编排如何快速响应提供新的部署方案。

6.3 端到端的虚拟化

现有的研究中,对移动核心网和无线接入网大多分开进行研究,如参考文献[67]只针对在移动核心网中提出了最小化成本的网络功能部署算法,参考文献[68]只针对在数据中心中提出了动态部署网络功能的优化算法。参考文献[52]只提出了在无线接入网络中虚拟功能部署算法。对于如何从无线接入端到移动核心网到数据中心的端到端

的联合网络功能虚拟化部署问题,在现有研究中很少涉及。而端到端的虚拟化技术,更符合应用 NFV 技术的初衷,有效降低网络服务的运营成本和资本支出,实现新技术的快速部署,并且有利于 NFV 技术在 5G 中的全面应用,适应 5G 的高要求和异构网络的灵活性。

6.4 可靠性与安全性

网络功能虚拟化技术实现了软硬件解耦,但由于将传统的网络功能以虚拟化的形式部署在通用硬件平台上,可靠性与安全性需重点考虑。可靠性表现在当虚拟网络功能出现故障时,需考虑如何在不影响服务体验的同时对网络功能进行重新编排,以及如何提高虚拟网络功能可靠性的备份保护机制^[69];安全性不仅需要考虑传统网络中存在的 DDoS 攻击、洪泛攻击等,还需考虑由于采用虚拟化手段导致的安全问题,比如,虚拟网络功能在创建、部署、删除阶段遭受的安全威胁,非法用户恶意接入虚拟网络盗用物理资源^[70]等;参考文献[71]提出了一种基于比例资源预留的备份恢复机制,将物理网络按比例划分一部分为备用资源,采用改进的离散粒子群算法快速地将服务分配给备用节点。参考文献[72]针对网络功能虚拟化环境下的单链路故障,提出了两种最优备份拓扑生成算法,既提高了可靠性又提高了资源利用率。参考文献[73]提出了在虚拟网络功能整个生命周期内的网络安全策略,如环境感知、安全启动等。而由于无线接入网络具有网络环境复杂多变、各种接入技术并存、时延敏感性高的特点,网络功能故障的快速修复与网络安全的问题显得更加迫切和复杂。

7 结束语

网络功能虚拟化技术在无线网络中的发展,有利于整个网络的虚拟化的实现,可以有效地降低网络的运营成本和资本支出,加快新技术的实行。通过网络功能虚拟化技术,可以实现网络功能的灵活部署,网络功能的放置不再受限于物理

拓扑的约束,可以根据具体的服务需求实现灵活的部署。本文从多种角度对无线资源虚拟化现状进行研究,包括各标准组织对无线网络下虚拟化研究的现状,无线网络中网络功能虚拟化的管理和编排的架构模型,无线网络中虚拟网络功能的部署问题。各标准组织对无线移动网络中虚拟化的研究,包括基站虚拟化的用例、移动核心网络中 NFV 管理功能和解决方案、可重构无线系统安全需求等标准。现有的研究中对无线网络中 NFV 管理和编排模型有两种,包括 Maestro 和 EmPOWER,分别从不同角度基于 ETSI 的 NFV 架构模型进行改进,以适用无线移动网络。如何实现无线网络中虚拟网络功能快速部署也是 NFV 研究中的重点问题,与移动核心网不同,需要考虑无线网络资源的分配。目前,在无线网络中应用虚拟化技术仍处于初步研究阶段,相关研究仍需要不断补充,虽然在无线网络中实现网络功能虚拟化前景广阔,然而,也存在一些挑战,包括有效的资源管理机制、无线网络中的时延特性、如何实现端到端网络的虚拟化以及可靠性与安全性等问题。

参考文献:

- [1] HAYES B. Cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2008, 51(7): 9-11.
- [2] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]// Edition of the Mcc Workshop on Mobile Cloud Computing, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012: 13-16.
- [3] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 29(7): 1645-1660.
- [4] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4): 593-612.
LIN C, TIAN Y, YAO M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4): 593-612.
- [5] ETSI. Network functions virtualisation (NFV); management and orchestration: GS NFV-MAN 001 V1.1.1[S]. 2014.
- [6] ETSI. Network functions virtualisation (NFV); use cases: GR NFV 001 V1.2.1[S]. 2017.
- [7] ONF. Software-defined networking: the new norm for networks[S]. 2012.
- [8] HAWILO H, SHAMI A, MIRAHMADI M, et al. NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC)[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 18-26.
- [9] HERRERA J G, BOTERO J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey[M]. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [10] BHAMARE D, JAIN R, SAMAKA M, et al. A survey on service function chaining[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 75(C): 138-155.
- [11] XIE Y, LIU Z, WANG S, et al. Service function chaining resource allocation: a survey[J]. CoRR, abs/1608.00095, 2016.
- [12] KATSALIS K, NIKAEIN N, EDMONDS A. Multi-domain orchestration for NFV: challenges and research directions[C]//International Conference on Ubiquitous Computing and Communications and 2016 International Symposium on Cyberspace and Security, Dec 14-16, 2016, Granada, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 189-195.
- [13] NGUYEN V G, BRUNSTROM A, GRINNEMO K J, et al. SDN/NFV-based mobile packet core network architectures: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, PP(99): 1.
- [14] 周伟林, 杨莹, 徐明伟. 网络功能虚拟化技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(4): 675-688.
ZHOU W L, YANG Y, XU M W. Network function virtualization technology research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(4): 675-688.
- [15] 邵维专, 吕光宏. 网络功能虚拟化资源配置及优化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018(2): 321-326.
SHAO W Z, LV G H. Survey on NFV resource allocation and optimization[J]. Application Research of Computers, 2018(2): 321-326.
- [16] 赵巍, 李勇. 基于 SDN/NFV 的移动核心网关键技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(4): 1-3.
ZHAO W, LI Y. Based on SDN/NFV key techniques of mobile core network[J]. Automation & Instrumentation, 2017(4): 1-3.
- [17] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICO J L, et al. Server placement and assignment in virtualized radio access networks[C]//International Conference on Network and Service Management, Nov 9-13, 2015, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2015: 398-401.
- [18] RODRIGUEZ V Q, GUILLEMIN F. VNF modeling towards the cloud-RAN implementation[C]//International Conference on Networked Systems, Nov 9-13, 2015, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [19] ABDELWAHAB S, HAMD AOUI B, ZNATI T, et al. Network function virtualization in 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(4): 84-91.
- [20] 张恒升. 基于 NFV 和 SDN 的无线网络虚拟化关键技术研究[J].



- 现代导航, 2017(3): 224-228.
- ZHANG H S. Research on key wireless virtualization technology based on NFV and SDN[J]. Modern Navigation, 2017(3): 224-228.
- [21] 张科, 李冬. 移动基站虚拟化标准用例研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2016, 29(6): 33-38.
- ZHANG K, LI D. Research on the virtualization of mobile base station[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2016, 29(6): 33-38.
- [22] ETSI. Network functions virtualisation (NFV) release 3; management and orchestration; report on management of NFV-MANO and automated deployment of EM and other OSS functions: GR NFV-IFA 021 [S]. 2018.
- [23] ETSI. Network functions virtualisation (NFV); virtual network functions architecture: GS NFV-SWA 001 [S]. 2014.
- [24] IETF. Problem statement for service function chaining: RFC 7498[S]. 2015.
- [25] ORDONEZ-LUCENA J, AMEIGEIRAS P, LOPEZ D, et al. Network slicing for 5G with SDN/NFV: concepts, architectures, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 80-87.
- [26] NGMN. 5G white paper[R]. 2015.
- [27] MARIIA S, SVITLANA S. Service deployment aspects in the systems with network function virtualization[C]//Radio Electronics & Info Communications, Sept 11-16, 2016, Kiev, Ukraine. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [28] TALEB T, BAGAA M, KSENTINI A. User mobility-aware virtual network function placement for virtual 5G network infrastructure[C]//IEEE International Conference on Communications, June 8-12, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 3879-3884.
- [29] LIU J, JIANG Z, KATO N, et al. Reliability evaluation for NFV deployment of future mobile broadband networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(3): 90-96.
- [30] WEN T, YU H, SUN G, et al. Network function consolidation in service function chaining orchestration[C]//IEEE International Conference on Communications, May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [31] 刘鑒, 虞红芳. 基于资源拆分的虚拟网络功能服务链映射算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(8): 2440-2445.
- LIU L, YU H F. Virtual network function service chain mapping based on resource splitting algorithm[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(8): 2440-2445.
- [32] 唐宏, 罗雨佳. NFV 业务链资源分配技术[J]. 电信科学, 2015, 31(11): 143-148.
- TANG H, LUO Y J. NFV service chain resource allocation technology[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(11): 143-148.
- [33] 徐雷. 网络功能虚拟化技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- XU L. Technology and application of network function virtualization [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [34] ETSI. Mobile edge computing (MEC); deployment of mobile edge computing in an NFV environment: GR MEC 017 [S]. 2018.
- [35] ETSI. Reconfigurable radio systems (RRS); security requirements for reconfigurable radios: TS103 436 [S]. 2018.
- [36] ETSI. LTE; Telecommunication management; fault management (FM) for mobile networks that include virtualized network functions; procedures (14.0.0 Release 14): TS128 516 V14.0.0[S]. 2017.
- [37] ETSI. LTE; telecommunication management; configuration management (CM) for mobile networks that include virtualized network functions; requirements version 14.1.0 (Release 14): TS128 500 V14.1.0 [S]. 2017.
- [38] ETSI. LTE; telecommunication management; performance management (PM); performance measurements evolved packet core (EPC) network (3GPP TS32.426 version 14.1.0 Release 14): TS132 426 V14.1.0 [S]. 2017.
- [39] IETF. Service function chaining use cases in fog RAN: draft-bernardos-sfc-fog-ran-03[S]. 2018.
- [40] IETF. Service function chaining use cases in mobile networks: draft-ietf-sfc-use-case-mobility-07[S]. 2016.
- [41] IETF. Service function chaining dataplane elements in mobile networks: draft-aranda-sfc-dp-mobile-04[S]. 2017.
- [42] IEEE. Network reference model and functional description of IEEE 802 access network: 802.1CF [S]. 2017.
- [43] 3GPP. Study on network management of virtualized networks: TR32.842 [S]. 2015.
- [44] DALLA-COSTA A G, BONDAN L, WICKBOLDT J A, et al. Maestro: an NFV orchestrator for wireless environments aware of VNF internal compositions[C]//IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Mar 27-29, 2017, Taipei, China. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [45] RIGGIO R, BRADAI A, RASHEED T, et al. Virtual network functions orchestration in wireless networks[C]//International Conference on Network and Service Management, Nov 9-13, 2015, Barcelona, Spain. Washington DC: IEEE Computer Society, 2015: 108-116.
- [46] LI Y, ZHENG F, CHEN M, et al. A unified control and optimization framework for dynamical service chaining in software-defined NFV system[J]. Wireless Communications IEEE, 2015, 22(6): 15-23.
- [47] BASTA A, HOFFMANN K, HOFFMANN K, et al. Applying

- NFV and SDN to LTE mobile core gateways, the functions placement problem[C]//The Workshop on All Things Cellular: Operations, Aug 17-22, 2014, Chicago, IL, USA. New York: ACM Press, 2014: 33-38.
- [48] JEMAA F B, PUJOLLE G, PARIENTE M. QoS-aware VNF placement optimization in edge-central carrier cloud architecture[C]//Global Communications Conference, Dec 4-8, 2016, Washington DC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [49] BAUMGARTNER A, REDDY V S, BAUSCHERT T. Mobile core network virtualization: A model for combined virtual core network function placement and topology optimization[C]//Network Softwarization, Apr 13-17, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-9.
- [50] BAUMGARTNER A, REDDY V S, BAUSCHERT T. Combined virtual mobile core network function placement and topology optimization with latency bounds[C]//Fourth European Workshop on Software Defined Networks, Sep 30-Oct 2, 2015, Bilbao, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [51] MARIIA S, SVITLANA S. Service deployment aspects in the systems with network function virtualization[C]//Radio Electronics & Info Communications, Sep 11-16, 2016, Kiev, Ukraine. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [52] MIJUMBI R, JOAN S, JUAN-LUIS G, et al. Placement and assignment of servers in virtualized radio access networks[J]. Computer Science, 2015.
- [53] RIGGIO R, BRADAI A, HARUTYUNYAN D, et al. Scheduling wireless virtual networks functions[J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2016, 13(2): 240-252.
- [54] 张朝阳. 无线网络虚拟化资源分配算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.
- ZHANG C Y. Research on resource allocation algorithm for wireless network virtualization[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [55] AROUK O, TURLETTI T, NIKAEIN N. Multi-objective placement of virtual network function chains in 5G[C]//IEEE International Conference on Cloud Networking, Sep 25-27, 2017, Prague, Czech Republic. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [56] HAN P, GUO L, LIU Y. Virtual network embedding in SDN/NFV based fiber-wireless access network[C]//International Conference on Software Networking, May 23-26, 2016, Jeju, South Korea. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [57] RIGGIO R, RASHEED T, NARAYANAN R. Virtual network functions orchestration in enterprise WLAN[C]//IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), May 11-15, 2015, Ottawa, ON, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [58] LU G, LIU C, LI L, et al. A dynamic allocation algorithm for physical carrier resource in BBU pool of virtualized wireless network[C]//International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, Sep 17-19, 2015, Xi'an, China. Washington DC: IEEE Computer Society, 2015: 434-441.
- [59] JEMAA F B, PARIENTE M, PARIENTE M. Analytical models for QoS-driven VNF placement and provisioning in wireless carrier cloud[C]//ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Nov 13-17, 2016, Malta. New York: ACM Press, 2016: 148-155.
- [60] ETSI. Network function virtualization (NFV); use cases[S]. 2013.
- [61] LIANG C, YU F R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 358-380.
- [62] ORDONEZ-LUCENA J, AMEIGEIRAS P, LOPEZ D, et al. Network slicing for 5G with SDN/NFV: concepts, architectures, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 80-87.
- [63] 王艳敏. 接入网虚拟化以及虚拟资源管理算法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- WANG Y M. Research on access network virtualization and virtual resource management algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [64] DUTTA S, TALEB T, KSENTINI A. QoE-aware elasticity support in cloud-native 5G systems[C]//IEEE International Conference on Communications, May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [65] LONG Q, ASSI C, SHABAN K. Delay-aware scheduling and resource optimization with network function virtualization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3746-3758.
- [66] CARPIO F, DHAHRI S, JUKAN A. VNF placement with replication for load balancing in nfV networks[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), May 21-25, 2017, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [67] MARIIA S, SVITLANA S. Service deployment aspects in the systems with network function virtualization[C]//Radio Electronics & Info Communications, Sep 11-16, 2016, Kiev, Ukraine. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [68] CLAYMAN S, MAINI E, GALIS A, et al. The dynamic placement of virtual network functions[C]//Network Operations and Management Symposium, May 5-9, 2014, Krakow, Poland. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-9.
- [69] 周桥, 伊鹏, 门浩崧. 基于资源效用最大化的虚拟网络功能备份方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(4): 948-953.
- ZHOU Q, YI P, MEN H S. Virtual network function backup



- method based on resource utility maximization[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(4): 948-953.
- [70] 赵慧玲, 解云鹏, 胡晓娟. 网络功能虚拟化标准及技术探讨[J]. 中兴通讯技术, 2015, 21(4): 45-50.
- ZHAO H L, XIE Y P, HU X J. Standard and technology of network function virtualization[J]. ZTE Technology Journal, 2015, 21(4): 45-50.
- [71] 黄睿, 张红旗, 常德显. 网络功能虚拟化环境下安全服务链故障的备份恢复机制[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(4): 768-781.
- HUANG R, ZHANG H Q, CHANG D X. A backup and recovery mechanism for security service chain fault in network function virtualization environment [J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(4): 768-781.
- [72] 韩青, 兰巨龙, 江逸茗. 一种保证 NFV 可靠性的最优备份拓扑生成方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(11): 3384-3387.
- HAN Q, LAN J L, JIANG Y M. Optimal backup topology generation approach to guarantee reliability of NFV[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(11): 3384-3387.
- [73] 苏坚, 肖子玉. NFV 中虚拟化网络功能生命周期安全管理措施[J]. 电信科学, 2016, 32(11): 127-133.
- SU J, XIAO Z Y. VNF lifecycle security management measures in NFV[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(11): 127-133.

[作者简介]



贾海宇(1994-), 女, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为下一代互联网、网络功能虚拟化和无线通信网络。



陈佳(1983-), 女, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为互联网体系架构、路由技术和移动互联网。



王铭鑫(1990-), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为下一代互联网、网络安全和软件定义网络。