

文章编号:1007-5321(2018)05-0078-08

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-165

服务化的5G核心网切片管理系统研究与实现

马璐^{1,2}, 王鲁晗^{1,2}, 陈炜³, 温向明^{1,2}, 王少春^{1,2}

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876;
3. 中国移动通信研究院, 北京 100053)

摘要: 提出了一种服务化的第5代移动通信系统(5G)核心网切片架构, 设计和实现了服务化的5G核心网切片管理系统原型验证平台. 该平台基于软件定义网络和网络功能虚拟化技术, 能够支持多设备厂商、多运营商共享基础网络设施和核心网切片的动态管理, 并能为不同场景的用户提供可靠和定制化的网络服务.

关键词: 微服务; 第5代移动通信系统; 网络切片; 编排与管理

中图分类号: TN929.53 **文献标志码:** A

Research and Implementation of Service Oriented 5G Core Network Slice Management System

MA Lu^{1,2}, WANG Lu-han^{1,2}, CHEN Wei³, WEN Xiang-ming^{1,2}, WANG Shao-chun^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: A slicing framework of a service oriented the fifth generation of mobile communications system (5G) is proposed. Furthermore, a prototype verification platform for slicing orchestration and management is designed and implemented. Through the simple and general testbed based on software defined network and network function virtualization, the resource sharing among various vendors and operators and the dynamic monitoring can be implemented. The tenants can get on-demand customization and guaranteed service on the top of common infrastructure.

Key words: microservice; fifth generation of mobile communications system(5G); network slicing; orchestration and management

近年来,随着通信流量和业务类型的爆发式增长,移动通信网络在带宽、时延、信令等方面面临空前的挑战. 然而,当前采用单体架构设计的移动核心网各功能耦合在同一网元,并且网元功能也与专用硬件相耦合^[1]. 任何网络的更新、升级都可能涉及网络设备的更换,这种架构难以应对当前的挑战,也无疑会增加网络运营商的投资成本和运维成本.

为了应对挑战,很多研究者在设计第5代移动通信系统(5G)网络架构时引入软件定义网络(SDN, software defined network)^[2]和网络功能虚拟化(NFV, network function virtualization)^[3],来进行控制面与数据面解耦和网络功能与专用硬件解耦^[4-6]. Jin等^[7-9]提出了基于SDN的移动网络架构,通过将传统分组核心网(EPC, evolved packet core)的网关

收稿日期: 2018-07-27

基金项目: 国家科技重大专项项目(2018ZX030110004); 教育部-中国移动科研基金项目(MCM20160104); 北京市科技计划项目(Z171100005217001); 北京邮电大学基本科研业务费项目(2018RC06)

作者简介: 马璐(1989—), 男, 博士生, E-mail: malu@bupt.edu.cn; 温向明(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

实体控制面与数据面分离,实现数据转发的集中式控制,提高了核心网数据转发效率. Yousaf 等^[10]提出了一种基于 NFV 技术的虚拟化移动核心网架构,通过虚拟化技术将 EPC 网元运行于通用的服务器上,实现网络功能与专用硬件的解耦. 也有很多研究者将 SDN 和 NFV 共同引入到移动网络架构设计中,同时考虑软硬件的解耦和控制与转发功能的分离,进一步提高了移动网络的灵活性和效率^[11-13].

虽然 SDN 和 NFV 技术提高了移动核心网转发效率以及管理、部署方面的灵活性,但是移动核心网的网络功能仍然耦合在一起作为一个单体结构的网元,难以针对 5G 时代多样化的需求提供定制化的服务,此外,这种基于单体网元的架构也会在进行扩容时一些模块被重复部署,造成资源的浪费.

最近,微服务的架构设计模式获得了越来越多的关注,它能为多种多样的应用提供灵活、定制化的服务^[14]. 基于微服务的思想,3GPP (3rd generation partnership project) 对 5G 移动核心网架构进行了重新设计,提出了 5G 核心网基于服务的架构 (SBA, service based architecture)^[15]. 针对多样化的业务需求以及 SBA 架构中的核心网功能模块的编排与管理,笔者提出了一种基于 SDN 和 NFV 的服务化 5G 核心网切片架构,并设计和实现了服务化的 5G 核心网切片管理系统原型验证平台,该平台支持多设备厂商和多运营商,支持核心网切片的动态管理,能够基于通用硬件平台为不同场景的用户提供可靠的和定制化的网络服务,进一步提高了网络管理的灵活性和可定制化.

1 服务化的 5G 核心网架构

为了满足不断涌现的新服务和新的应用需求,降低网络运营商的运行维护成本,5G 移动网络必须提高灵活性、可扩展性和可部署性. 因此,基于微服务的架构设计思想,3GPP 提出了服务化的 5G 核心网架构^[15] (见图 1). 该架构根据微服务的思想对传统的移动核心网架构进行了重构,各网元被划分为更加轻量级的网络功能 (NFs, network functions) 模块,每个 NF 只负责单一的网络功能,它们相互隔离,可独立进行开发、演进和部署,不同的 NF 之间通过 API (application interface) 接口进行通信. 服务化 5G 核心网架构是一个 3 层架构,主要包含: 用户面、控制面和应用层.

1) 用户面. 主要由可编程的用户面功能 (UP-

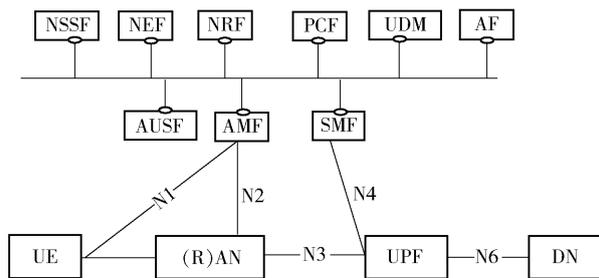


图 1 服务化的 5G 核心网参考架构

Fs, user plane functions) 模块组成,负责用户数据的转发. UPFs 与基站 (BS, base station) 间会话建立以及数据转发规则都由控制面控制.

2) 控制面. 核心网的控制面完全根据微服务的思想进行了重新设计,对传统的移动核心网网元设备进行了重构和模块化,耦合在一起的网络功能被分割为更加轻量级的 NFs,主要的 NF 模块功能包括以下 6 部分.

① 接入和移动性管理功能 (AMF, access and mobility management function): 主要负责连接管理、接入管理、移动性管理等功能,是 5G 核心网最为重要的功能模块. AMF 负责处理用户的附着请求,初始化鉴权流程,当用户初始接入网络或者移动至新的覆盖区域,处理用户位置更新和 UPF 选择.

② 会话管理功能 (SMF, session management function): 主要负责根据网络管理策略进行会话的建立、修改和释放,用户终端 (UE, user equipment) IP 地址分配、QoS (quality of service) 设置、合法拦截等.

③ 鉴权服务功能 (AUSF, authentication server function): 主要负责用户接入网络时的鉴权,类似于 LTE (long term evolution) 中 MME (mobility management entity) 的鉴权功能,产生密钥,实现对 UE 的双向鉴权.

④ 统一数据管理功能 (UDM, unified data management): 主要负责用户标识处理、访问授权、订阅管理等.

⑤ 策略管控功能 (PCF, policy control function): 为网络管理行为提供了一个统一的策略框架,提供策略和规则给控制面执行.

⑥ 网元贮存功能 (NRF, NF repository function): 支持服务的发现,负责维护可用 NF 模块的信息,提供 NF 实例或 NF 的 IP 地址或相应标识.

3) 应用层. 提供各种不同的设备和应用场景

需要的多样化服务。例如:5G 核心网需要为增强移动宽带、大规模物联网、车联网等在移动性、时延、安全性、成本等方面有不同要求的各场景提供差异化的服务。

2 服务化的 5G 移动核心网切片

5G 时代的网络运营商需要满足不同用户、应用场景的多样化服务需求,并提供差异化、有保障的服务,在目前网络架构中,为了实现这样的目标,需要为每种服务或场景部署不同的专用硬件,这种方案将会极大提高运营商的运营成本。为此,提出了一种基于 SDN 和 NFV 技术、具有服务保障的网络切

片架构,并对切片编排和管理系统平台进行设计和实现,使网络运营商能够基于通用的基础通信设施为用户提供定制化、有保障的网络服务。

2.1 服务化的 5G 移动核心网切片架构

服务化的 5G 核心网切片架构如图 2 所示,基于 SDN、NFV、微服务思想,轻量级的 NFs 运行于虚拟化的云平台上;虚拟化的 NF 模块可以部署在云平台组成移动云核心网(MCC, mobile cloud core),也可以下沉至接入侧基站附近组成移动边缘核心网(MEC, mobile edge core),SDN 控制器负责 NF 的部署、管理和迁移,并为每个核心网切片建立 SDN 虚拟隧道连接(VPN 连接)。

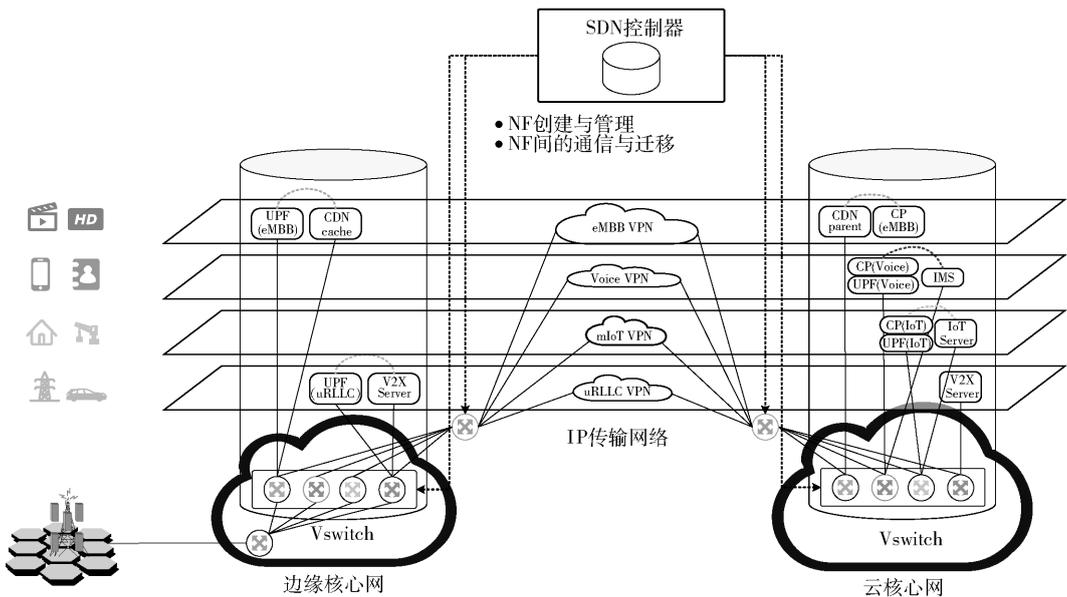


图2 服务化的 5G 核心网切片架构

基于此架构,运营商可以根据既定策略为用户提供定制化的网络切片。例如,为满足增强移动宽带(eMBB, enhanced mobile broadband)场景的需求,可以将相应的 UPF 和内容缓存服务器部署于靠近基站的边缘核心网平台,构成 eMBB 核心网切片;针对超高可靠超低时延通信(uRLLC, ultra-reliable & low-latency communications)场景中的车联网业务需求,将相应的 UPF 和车联网(V2X, vehicle to everything)服务器部署于边缘核心网平台,构成 uRLLC 核心网切片;对于传统的语音业务和时延与带宽不敏感的物联网业务,则仍将网络功能模块集中部署于云核心网平台。所有网络切片都是相互隔离、端到端的逻辑网络,运行于共享的通用硬件平台之上,系统为每个切片分配不同的虚拟服务器资源、网络带宽和 QoS 保障。

2.2 服务化的 5G 移动核心网切片编排与管理系统设计

针对网络切片编排与管理(O&M, orchestration and management)这一重要问题,笔者提出了一种面向服务化的核心网切片管理与编排系统,如图 3 所示。

首先,对于虚拟化平台的基础设施管理,以及核心网切片中的虚拟化网络功能(VNF, virtualized network function)的部署、管理与编排等功能,采用了网络功能虚拟化管理和编排(NFV MANO, NFV management and orchestration)架构,实现在专用物理设备上构建虚拟化网络切片实例(NSI, network slice instances)以及网络服务的部署和连接。其中,虚拟化基础设施管理(VIM, virtualized infrastructure management)负责管理虚拟化平台基础设施,进行

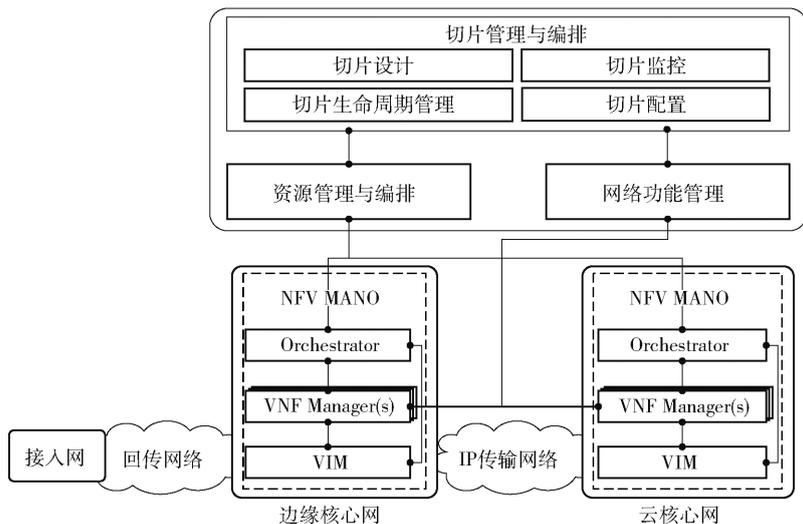


图3 服务化的5G核心网切片管理与编排系统架构

VNF 的虚拟资源分配,例如:虚拟化计算资源、存储资源和网络资源;虚拟化网络功能管理(VNFM, virtualized network function management)与网络功能管理(NFM, network function management)协调,根据切片管理与编排(SMO, slice management and orchestration)生成的网络切片描述符(NSD, network slice descriptor)等信息进行 VNF 的生命周期管理,如 VNF 的上线、下线、状态监控等;网络功能虚拟化编排器(NFVO, network function virtualization orchestrator)负责执行 SMO 制定的核心网切片生命周期管理策略,配合资源管理与编排(RMO, resource management and orchestration)执行 NSI 的实例化,对 NSI 所需的网络资源、计算资源进行管理和编排,并协调 VNFM 进行 VNF 生命周期管理,协调 VIM 进行各类虚拟化资源管理。

其次,SMO、RMO、NFM 三个功能模块构成核心网切片操作系统(NSOS, network slicing operation system),实现网络切片的设计、监控、配置和管理。

1) SMO. 负责端到端网络切片服务级的管理与编排,包括切片设计、监控、生命周期管理、切片配置等,主要包含 4 个功能模块。

① 切片设计. 针对不同场景和需求设计切片的网络功能、架构、业务流程等,生成网络切片模板,并将网络切片模板翻译为 NSD 和相应的配置文件。

② 切片配置. 存储切片设计环节生成的配置文件,与 NFM 模块进行交互,对 NSI 中的网络功能进行配置,并将配置文件发送至 NFM 和 RMO。

③ 切片生命周期管理. 分析核心网切片的所

有性能数据,制定生命周期管理策略;对 NSI 进行服务级的生命周期管理,包括切片创建、删除、功能扩展等。

④ 切片监控. 对网络运营商生成的 NSI 进行监控,向 NFM 收集网络切片的性能数据。

2) RMO. RMO 负责根据 SMO 生成的 NSD 以及配置文件进行网络切片的实例化,并对网络切片中的多域资源进行管理与编排。RMO 具有全局的网络资源视图,包括回传网、IP 传输网、数据中心资源等,能够为 NSI 提供所需的网络资源、计算资源,并进行资源的分配、监控、管理和调度。

3) NFM. NFM 类似于传统的运营支撑系统或网元管理系统(OSS/EMS, operation support system/element management system),负责网络功能的 FCAPS(fault, configuration, accounting, performance and security)管理,根据 SMO 生成的配置文件对网络切片进行服务级的管理,例如,网络切片标识符与网络切片实例 NSI 之间的映射。NFM 与底层的 VNFM 协调,基于 SMO 生成的 NSD 进行 VNF 生命周期管理。

3 服务化的 5G 移动核心网切片编排与管理原型验证平台的实现

基于一些开源的项目或工具对上述切片编排和管理架构进行了实现,开发了服务化 5G 核心网切片编排与管理原型验证平台,如图 4 所示。整个系统采用基于微服务的架构,各组件为一个微服务单元,可独立研发、部署、升级以及扩展,组件间交互主

要通过 REST (representational state transfer) 接口实现,同时,引入 API 网关实现服务的注册、发布以及 API 管理。

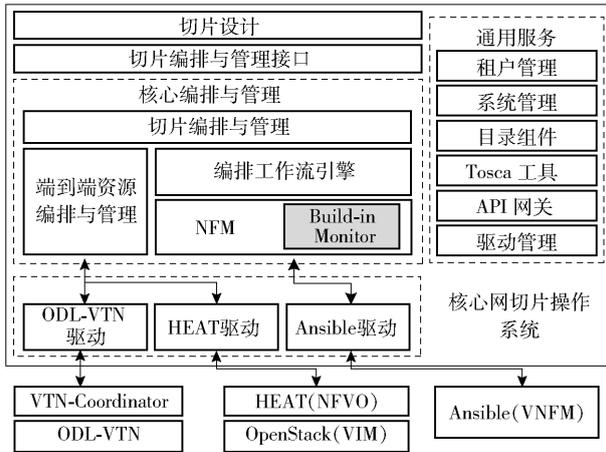


图 4 原型验证平台的实现架构

首先,利用 OpenDaylight 与 OpenStack 集成,实现底层虚拟化资源管理架构。其中,OpenStack 的 HEAT 组件实现了 NFVO 的功能,完成核心网切片所需的数据中心虚拟机资源以及网络资源的编排和自动化部署,VNFM 功能则通过开源的配置管理工具 Ansible 实现,通过与 VNF 所在主机交互,完成切片所需的业务配置和自定义检测功能部署。对于 VNF 间的连接需求,则通过 OpenDaylight 构建虚拟租户网络(ODL-VTN, opendaylight-virtual tenant network)来实现。ODL 控制器作为 OpenStack 的网络服务提供者,在控制面,能够与 OpenStack 节点、OpenFlow 交换机进行通信,在数据面,OpenStack 节点上运行的 OpenvSwitch 能够通过 OpenFlow 交换机互相通信。VTN-Coordinator (virtual tenant network coordinator)作为基础设施网络资源管理平台,根据 RMO 传递的 VNF 间连接需求,完成切片所需的数据中心网络资源的编排和部署。

其次,对于核心网切片的编排与管理的实现,本文提出了核心网切片操作系统的概念,主要包括通用服务、核心编排与管理、驱动组件、切片设计等,各部分的具体组件以及其功能如下。

1) 通用服务。提供网络切片管理所需要的基础功能,主要包括租户信息管理、服务注册和发现、驱动管理等。

① 租户管理组件。该组件为切片编排管理系统提供租户信息管理功能,支持运营商对租户信息进行管理,包括租户信息的添加、存储、更新与删除,

同时为运营商的租户切片管理提供租户切片信息以及切片订购功能。

② 系统管理组件。该组件为切片编排管理系统本身提供系统管理功能,包括系统组件的生命周期管理(如组件的注册、激活、离线、注销等)、组件信息管理(如版本信息、开发者信息、证书等)、组件健康度管理、组件 AAA 管理等。

③ 目录组件。该组件为切片编排管理系统提供模板文件的目录管理服务,包括查询、存储与获取服务。

④ TOSCA 工具组件。TOSCA (topology and orchestration specification for cloud applications)是由 OASIS 组织制定的云应用拓扑编排规范,用以描述云平台上应用的拓扑结构。该组件以可重用代码的方式,为其他组件提供面向 TOSCA 模型的数据处理 API,包括 TOSCA 模型的生成与解析等功能。利用 Apache ARIA (accessible rich internet applications) TOSCA 可实现该组件功能。

⑤ API 网关组件(API GW, API gateway)。这是服务化 5G 核心网架构中的重要组件,为 NFs 提供 API 管理、注册、发布和协作等功能。利用开源的 WSO2 API 管理器可实现 NF API 的设计、创建、发布和管理等功能。

⑥ 驱动管理组件。提供驱动层组件的管理服务,包括驱动的注册、激活、离线以及注销等,维护并管理驱动信息。

2) 核心编排与管理。提供切片监控、配置以及切片级的编排与管理。

① 切片编排与管理组件。负责切片上下文(记录切片整体的信息与状态,如切片摘要、运行状态、相关模板目录信息、全局配置参数、全局策略信息等)、切片生命周期管理事件的维护与管理,并作为切片生命周期管理流程在切片管理系统内部的发起点,接收运营商通过 Slice O&M-UI 提交的切片生命周期管理请求以及生命周期管理相关事件,决策并组织协同其他组件完成切片生命周期管理任务,包括切片资源部署与释放、切片业务实例化与终止,进一步支持自动化扩缩容与主动切片更新,实现切片资源与业务的编排与管理,并支持自定义监测功能部署与业务指标监测功能。

② 编排工作流引擎组件。接收来自 Slice O&M 的切片业务实例化请求,根据基于 BPMN (business process management initiative) 的工作流描述模型,调

用网络功能管理组件(NFM)相关接口,完成相关业务配置流程,并提供BPMN文件管理功能。

③ 网络功能管理组件(NFM):该组件基于Slice O&M传递的切片相关网络功能配置接口信息实现配置接口的注册与管理,并根据Plans Engine业务实例化任务调用、执行相应的配置接口操作,是业务配置的执行者;同时维护与管理网络功能的配置状态信息,根据Plan workflow引擎的任务调度完成网络功能业务配置、生命周期管理、自定义监测功能部署等,NFM包含一个内置的监测组件(Build-in monitor),为内置的监测功能提供监测数据收集与存储功能,该内置监测组件可基于开源的Nagios实现。

④ 端到端资源编排与管理组件:接收来自Slice O&M的切片资源部署或释放请求,根据基于TOSCA NFV模型的NSD与VNFD(virtual network function descriptor),通过相关驱动组件与基础设施管理平台(包括网络资源管理平台及数据中心资源管理平台)交互,完成对切片生命周期管理所需的资源编排。该组件收集并维护基础设施资源状态信息,包括全局资源状态信息与切片资源状态信息,维护并管理切片资源上下文。

3) 驱动层组件:主要提供核心网切片操作系统与底层的网络资源与数据中心资源管理系统的衔接和适配功能。

① ODL-VTN 驱动组件:该组件根据E2E Resource O&M下发的切片VNF间连接需求,通过基础设施网络资源管理平台(VTN Coordinator),完成切片所需数据中心间网络资源的编排部署。同时,ODL-VTN Driver采集基础设施数据中心间网络资源信息并上传至E2E Resource O&M。

② HEAT 驱动组件:该组件根据E2E Resource O&M下发的切片VNF资源部署需求,通过基础设施资源管理平台(Openstack HEAT),完成切片所需数据中心虚拟机及数据中心内网络资源的编排部署。同时,HEAT Driver采集基础设施数据中心资源信息并上传至E2E Resource O&M。

③ Ansible 驱动组件:该组件根据NFM下发的切片VNF配置请求以及自定义监测功能部署请求,通过VNFM(Ansible),与VNF所在主机交互(通过Ansible代理机)完成切片所需业务配置及自定义监测功能部署。

4) 切片设计组件:为运营商提供按需提供网络

切片定制功能,包括VNF设计、VNF关系设计、NS设计、NS套餐设计等功能,并支持将最终设计结果打包为可部署的文件包或者TOSCA模型脚本。

所有NSI都运行在基于SDN和NFV的网络虚拟化平台之上,网络切片由运行在虚拟机或者虚拟容器中的不同类型的NFs组成。切片设计组件为整个系统提供了可视化、图形化的切片设计界面,核心网切片操作系统与基础设施资源交互,负责完成切片的生命周期管理。

4 原型验证平台目前支持的特性

提出的服务化5G核心网切片编排与管理系统的原型验证平台目前支持3个特性。

1) 支持按需的切片设计

所提出的原型验证平台支持网络切片能力的按需定制,各个NSI能够通过核心网切片操作系统在切片模板设计、NSI部署和编排管理过程中进行协同管理。通过该平台进行切片定制化流程如图5所示。首先,运营商收到用户的端到端网络切片的需求后,将其转化为能够被切片设计模块识别的需求描述语言/文件并发送给切片设计模块;然后,切片设计模块根据输入的描述语言/文件对网络切片功能进行设计,并生成可部署的切片模板文件;最后,核心编排与管理平台利用底层虚拟化平台的基础资源执行核心网切片的实例化和切片管理等。

2) 支持动态的切片监控

实现的原型系统平台基于内置的监测组件(build-in monitor),在底层驱动的配合下能够实现动态的切片状态监测。切片实例化中切片监测配置流程如图6所示,首先,Slice O&M向NFM发起监测文件部署请求,然后NFM向驱动层发起文件部署操作请求,驱动层根据NFM提供的文件路径和目标主机从Catalogue获取文件并执行监测文件部署。同样地,驱动层根据Slice O&M、NFM指令完成监测功能部署并调用相应接口,完成切片监测配置。此外,该平台能够实现时延、吞吐量、用户数量等参数的动态监测,通过动态的切片监测,运营商能够准确分析系统动态以及运营数据,有助于其制定更加高效的网络管理策略。

3) 支持多设备商和多运营商场景

网络运营商能够通过网络切片编排与管理平台实现对不同设备商提供的网络基础设施的管理;通过核心网切片操作系统,也能实现多运营商共享基

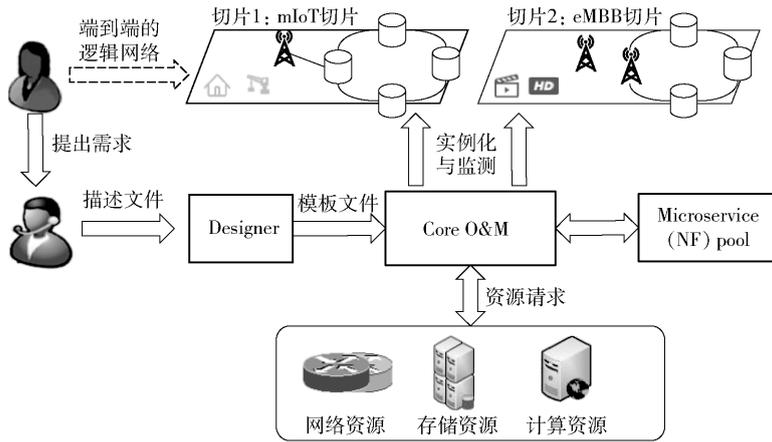


图5 服务化核心网切片定制流程

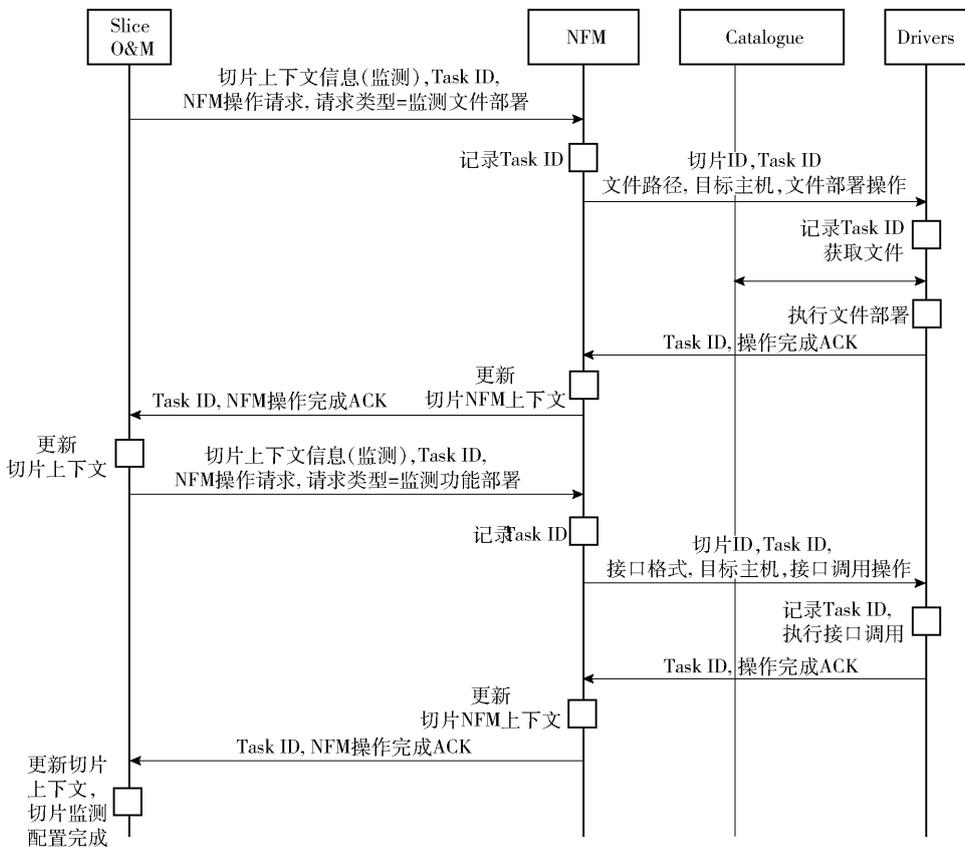


图6 切片实例化中切片监测配置流程

础网络设施,提高资源的利用率。

5 结束语

研究了服务化 5G 核心网的网络切片编排与管理架构的设计与实现。首先,介绍了传统的移动网络架构,分析了目前面临的挑战以及发展趋势。然后,针对 5G 服务化移动网络架构以及 5G 典型的应用场景,提出了服务化 5G 核心网切片架构,并进一

步设计并实现了基于 SDN 和 NFV 技术的 5G 核心网切片编排与管理原型验证平台,运营商通过该平台能够基于通用硬件为用户提供定制化、有保障的网络服务。在未来工作中,将主要对目前原型验证平台功能进一步完善,并进行相应的性能评估。

参考文献:

- [1] Li Y, Chen M. Software-defined network function virtualization: A survey [J]. IEEE Access, 2015, 3: 2542-

- 2553.
- [2] Chen T, Matinmikko M, Chen X, et al. Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(11): 126-133.
- [3] Han B, Gopalakrishnan V, Ji L, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(2): 90-97.
- [4] Riggio R, Bradai A, Harutyunyan D, et al. Scheduling wireless virtual networks functions[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2016, 13(2): 240-252.
- [5] Bouras C, Kollia A, Papazois A. SDN&NFV in 5G: advancements and challenges[C]//2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN). Paris: IEEE Press, 2017: 107-111.
- [6] Zhang H, Liu N, Chu X, et al. Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 138-145.
- [7] Jin Xin, Li Erran Li, Vanbever L, et al. Softcell: scalable and flexible cellular core network architecture[C]//The ninth ACM conference on Emerging networking experiments and technologies. Santa Barbara: ACM Press, 2013: 163-174.
- [8] Yazici V, Kozat U C, Sunay M O. A new control plane for 5G network architecture with a case study on unified handoff, mobility, and routing management[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(11): 76-85.
- [9] Pentikousis K, Wang Y, Hu W. Mobileflow: toward software defined mobile networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(7): 44-53.
- [10] Yousaf F Z, Lessmann J, Loureiro P, et al. Softepc: dynamic instantiation of mobile core network entities for efficient resource utilization[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest: IEEE Press, 2013: 3602-3606.
- [11] Akyildiz I F, Lin S C, Wang Pu. Wireless software-defined networks (WSDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: an overview and qualitative evaluation[J]. *Computer Networks*, 2015(93): 66-79.
- [12] Lin S C, Akyildiz I F, Wang Pu. Softair: a software defined networking architecture for 5G wireless systems[J]. *Computer Networks*, 2015(85): 1-18.
- [13] Wang H, Chen S, Xu H, et al. Softnet: a software defined decentralized mobile network architecture toward 5G[J]. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 16-22.
- [14] Fowler M. *Microservices guide*[EB/OL]. 2014(2014-03-25)[2018-07-27]. <http://martinfowler.com/microservices/>.
- [15] 3GPP. 3GPP TS 23. 501—2017, System architecture for the 5G system (Release 15) [S]. Sophia-Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2017.