



基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构

安琪¹, 刘艳萍¹, 孙茜², 田霖²

(1. 河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;

2. 中国科学院计算技术研究所移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190)

摘要:传统网络架构面临着结构封闭僵化、数据传输转发性能高度受限以及资源利用率低等问题,使其不能满足未来多样化的服务需求。为了解决这个问题,引入了网络切片的概念,并将网络功能虚拟化(NFV)与软件定义网络(SDN)等前沿技术相互融合在一起,提出了一个面向未来移动通信的新型网络架构——基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构。这种新的网络架构能够根据第三方需求来为用户提供个性化的网络服务,实现网络资源的共享和隔离,节省了运营商的在基础设备方面的大量花费。

关键词:SDN;NFV;网络切片;架构研究

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016269

Network slicing architecture based on SDN and NFV

AN Qi¹, LIU Yanping¹, SUN Qian², TIAN Lin²

1. School of Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Beijing Key laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The traditional network architecture has some problems such as closed rigid structure, highly restricted data forwarding performance, and low utilization rate of resources, which can't meet the diverse services' requirements. In order to solve these problems, the concept of network slice was introduced. A novel network architecture for future mobile communication was proposed, which is based on network function virtualization(NFV) and software defined networking (SDN). This new network architecture can provide personalized network services to users based on third-party needs, share and isolate of network resources, the cost of a large number of operators was saved in terms of infrastructure.

Key words: SDN, NFV, network slice, architecture research

1 引言

目前移动通信行业已经进入以数据为中心的时代^[1],终端接入数目、种类和业务量呈爆炸式增长^[2],如爱立信研究

主管 Jan F 预计 2015–2021 年全球移动用户将增长 17 亿户,全球联网设备数量将达到 280 亿部,是 2014 年数量的 4 倍之多^[3];而虚拟现实、云端办公、智能家居和车联网等新颖的业务体验也层出不穷。这为用户带来了在网络带

收稿日期:2016-09-07;修回日期:2016-10-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61431001)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61431001)



宽、时延、吞吐量和可靠性等方面具有不同需求的多样化服务。比如,物联网通信将在未来网络中成为移动通信行业的主流,与人和人之间的通信相比,物联网的通信场景将会更加复杂,既有大规模的机器通信,又有关键任务型通信,不同场景对于容量、时延、速度、电池寿命和安全性等方面也有着不同需求。例如智能交通的主要特点是超低时延和安全性,农业环境监测的通信设备由于安装位置固定而不需要考虑它的移动性管理等。目前,蜂窝异构网络的超密集部署是为了满足海量的用户和业务的需求所采用的主要手段,但是基站的利用率低下且耗资过高以及无线资源缺乏等问题限制了蜂窝技术的发展。传统网络架构具有典型“一刀切”的特点,带有专用的支撑系统和IT系统,设备都是软硬件紧耦合的,适合单一类型服务的用户网络,但是这种垂直网络架构限制了移动通信网络的扩展,难以根据用户需求的不断变化来对网络进行调整、创新、改造和升级以及满足新型用例需求。因此,如何在低消费高密量的有效途径下,满足多样化的服务需求以及终端海量连接的接入需求^[4]是通信领域目前研究的重点,而NS(network slice,网络切片)^[5]技术可以很好地解决这个问题。且在《5G网络架构设计》白皮书^[6]中已经表明NS成为5G代表性的网络服务能力之一。目前NFV(network function virtualization,网络功能虚拟化)与SDN(software defined networking,软件定义网络)是实现NS的主要技术支撑。结合NFV与SDN技术,提出了一个面向未来的新型网络切片架构,主要针对NS的网络架构、功能模块、协议栈自定义以及定制化过程进行了分析,其中NS的资源共享和高度隔离性是NS实现的重点和难点,最后指出了目前NS架构所面临的主要技术挑战。

2 网络切片技术简介

NS是虚拟网络^[7],是一个端到端的逻辑网络^[8]。它与虚拟化紧密相连,可提供一种或多种网络服务,是网络共享的一种形式,是按需组网的一种方式。其中虚拟网络间的资源共享与隔离是网络切片的两个硬性指标。NS可以根据特定业务的网络需求,如功能、性能、安全、运维等方面,提供差异化的网络特征,降低网络的复杂性、提升网络运行的性能以及用户的业务体验、降低网络部署及运维的成本。NS的主要优点如下^[9]。

- 网络资源利用最优化:NS可以通过业务场景需求对网络进行定制化裁剪以及实现灵活的网元组网,

优化业务流程和数据路由,使得网络资源的利用达到最优化。

- 动态的分配资源:NS能够满足用户的动态需求,使网络具有动态分配资源的能力,从而提高网络资源利用率。
- 提升网络的灵活性:NS需要弹性和灵活的扩展,当业务需求和用户数量可能出现动态变化时,可以将多个NS进行融合,或将一个NS切分成多个NS,以便更灵活地适配用户动态的业务需求。
- 提高网络的安全性:通过NS可以将两个业务应用间的网络资源进行隔离和区分,一个切片的配置、拥塞和过载的调整不会影响其他切片,能够在保证当前业务质量的前提下,增强整体网络的安全性和韧性。

NS与虚拟化技术息息相关,SDN与NFV是实现NS的关键技术支撑,SDN与NFV的主要功能概述如下。

NFV主要实现传统电信设备的软硬件解耦、网元动态创建和提供虚拟资源,运用虚拟化技术将物理资源抽象化,形成可以供上层应用的虚拟资源,实现对网络功能的虚拟化^[10-12]。移动网络运营商(MNO)通过利用NFV可以降低CAPEX(capital expenditure,资本支出)/OPEX(operating expense,运维支出),提高网络灵活性和可管理性,减少产品上市时间,支持快速实例化和资源的动态分配,并降低成本^[13]。NFV将成为运营商网络重构、架构重构、运营重构、业务重构的重要技术。

SDN的主要功能是网络规划、能力开放、控制转发分离、灵活调用和集中控制,它可以分离网络设备的转发平面和控制平面,灵活调度和控制网络流量,实现网络自动化和智能化;通过开放API(application programming interface,应用程序编程接口)和逻辑抽象业务,增强了业务编排的灵活性,实现网络开放化^[13];分离网络架构中的数据平面和控制平面,能够简化网络的配置和管理,从而降低网络的运营、维护和管理成本,促进网络创新的可编程性,提供网络方便性,并提供更好的安全性和更高效率^[14]。

3 基于SDN与NFV的网络切片架构

目前,针对未来网络架构研究方面,关注点主要聚焦在NFV、SDN、云计算以及NS等方面。对于NS方面,3GPP相关提案中根据多样化的服务需求提出了很多如何对网

网络切分的架构设想,主要是从 CN (core network)、CN & RAN(radio access network,无线接入网)以及 RAN 侧建立 NS,其中 CN 侧切片居多,但没有从全局视角出发将 NS 放到整个移动通信架构中进行研究,缺乏引入 NS 后对网络架构影响的分析。

将 NFV、SDN 和 NS 等关键技术进行融合,提出了一种基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构,详细描述了每个模块在网络中的功能,展示了 NS 的定制化过程,加深了人们对 NS 的理解。该架构同时考虑了未来网络架构的通用化、高利用率和低成本等演进需求以及物联网工业控制和远程医疗等多样化的服务需求,一方面利用 NS 和 NFV 技术实现网络架构的灵活性以及虚拟资源共享,另一方面采用 SDN 控制器实现集中式方法来统一控制各个层的模块。

3.1 基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构概述

如图 1 所示,基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构主要由五大部分组成:OSS(operation support system,运营支撑系统)/BSS(business support system,业务支撑系统)模块、虚拟化层、SDN 控制器、硬件资源层以及 MANO (NFV

management and orchestration)模块。

每个模块的主要功能如下。

(1) OSS/BSS

是全局管控的角色,负责整个网络的基础设施和功能的静态配置,限制整体上对子网或者服务的资源,是整个网络的总管理模块。通过接收第三方(例如运营商、服务提供商等)需求来为虚拟化层中的网元管控模块提供定制化策略;在切片建立的过程中为切片生成相对应的切片标识符;通过分析第三方需求来对虚拟化层、SDN 控制器、硬件资源和 NFV 管理和编排模块进行管理和配置,可及时更新这些模块配置信息,维护 SDN 控制器的运行环境,以便能够实时做出调整。当网络服务使用通用切片(即符合传统网络架构特点的切片)既可以满足需求,而不需要定制化切片时,OSS/BSS 模块支持网络服务自动映射到设备。

(2) 虚拟化层

主要由核心网虚拟网元管控、接入网虚拟网元管控和虚拟资源模块组成。其中,核心网虚拟网元管控可以通过

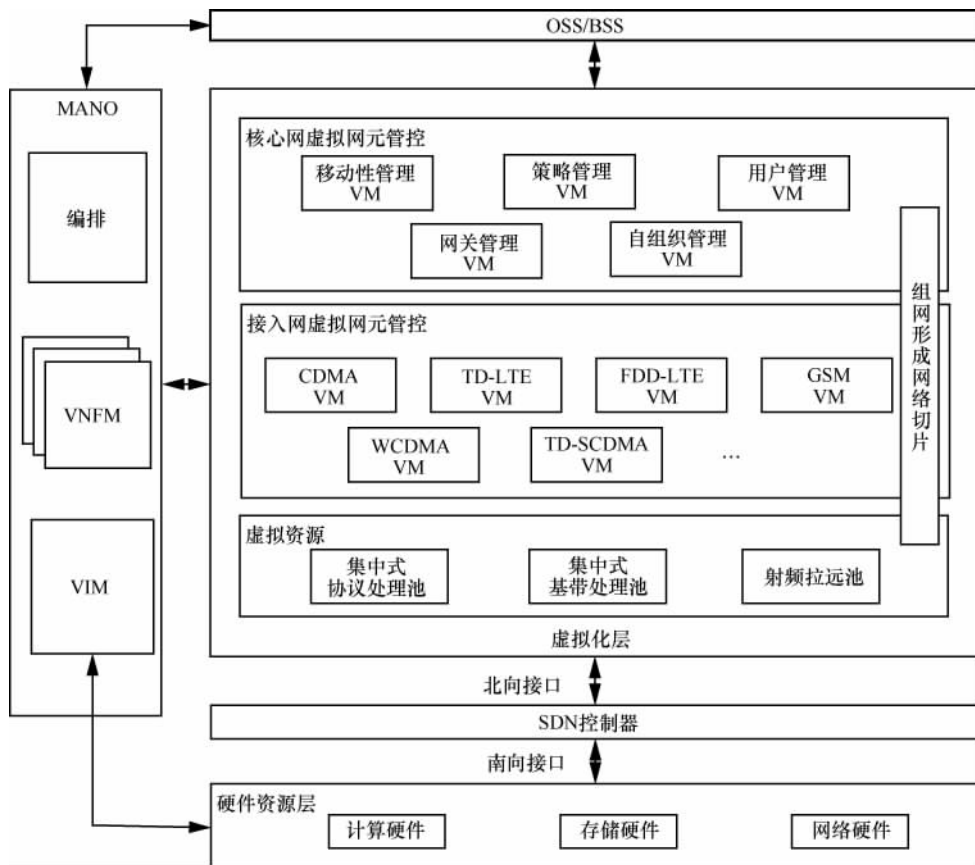


图 1 基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构



NFV 技术将核心网中的网元进行解耦和重构,然后生成用户所需的功能网元,并能够根据需求对核心网功能网元进行动态地修改、增加、更新和释放;接入网虚拟网元管控模块可以生成多个不同制式的虚拟基站或虚拟基站群,这些虚拟基站或虚拟基站群则是所属核心网的接入网网元,也可以根据 OSS/BSS 模块和核心网虚拟网元管控模块的反馈信息来对接入网虚拟网元进行创建和释放等操作,核心网将切片标识符发送给 UE(user equipment,用户终端),然后 UE 通过辨识切片标识符来正确地接入所属接入网网元,从而与运营商建立通信连接。虚拟资源模块中主要包含集中式协议处理池、集中式基带处理池和射频拉远池,其中,集中式协议处理池主要包含接入网的控制面和用户面协议,通过虚拟化技术以及 SDN 技术,可实现软件定义协议栈,根据上层信令的反馈,自动生成对应的协议资源;集中式基带处理池由多个 BBU(base band unit,基带处理单元)组成,所生成的 BBU 与接入网虚拟网元管控模块生成的虚拟基站和虚拟基站群具有直接的对应关系;射频拉远池由多个 RRU(radio remote unit,射频拉远单元)组成,BBU 与 RRU 通过光纤实现连接,主要的网络拓扑组网方式有星型、链型和环型等,可将这些不同组网方式形成的网络看成不同的切片,用以满足具有特定需求的租户。

(3)SDN 控制器

SDN 控制器是逻辑上可以集中或分散的控制实体。在控制平面,通过对计算硬件、存储硬件和网络硬件资源进行统一的动态调配和软件编排,实现硬件资源与编程能力的衔接;在数据平面,通过对虚拟化层的操作行为进行抽象,利用高级语言实现对虚拟化层各功能网元之间接口的定制化,从而达到面向性能要求和上层应用的资源优化配置的目标。SDN 控制器作为基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构中的“转换单元”,按照一定的策略可以实现虚拟网络资源(虚拟化层)与真实物理资源(硬件资源层)间的映射,且此“转换单元”能够自动调整映射的策略,这样能够允许通过更好的资源利用和服务保障来满足用户需求。使用 SDN 控制器的可编程特性实现自动化,能够简化传统网络虚拟化场景中复杂的配置工作,使虚拟化技术具有更强的灵活性和弹性。

(4)硬件资源层

主要包括计算硬件、存储硬件和网络硬件,例如服务器、操作系统、交换机、管理程序和网络资源,以及用户连

接到 VNF(virtualized network function,虚拟网络功能)的物理交换机等,是支持整个通信网络的底层硬件资源池。

(5)MANO

MANO 是 NFV 的管理编排模块,主要由 VIM(virtualized infrastructure managers,虚拟化基础设施管理者)、VNFM(virtualized network functions management,虚拟网络功能管理)和编排(orchestrator)3 个实体组成,主要负责整个网络的基础设施和功能的动态配置,完成对虚拟化层、硬件资源层的管理和编排,负责虚拟网络和硬件资源间的映射以及 OSS/BSS 对业务资源流程的实施等。首先,OSS/BSS 依据服务需求生成相关的 NS 用例,此 NS 用例中包含此服务所需的网络功能网元、网元间的接口和网元所需的网络资源;然后,MANO 按照该 NS 用例来申请所需的网络资源,并在申请到的资源上实例化创建虚拟网络功能模块的接口。MANO 实现对形成 NS 的监督和管理,通过分析实际的业务量对网络资源分配时进行扩容、扩容和动态调整,在生命周期截止时释放 NS。利用大数据驱动的网络优化实现合理的网络资源分配、自动化运维和 NS 切分,实时响应业务和网络的动态变化,保证高效的网络资源利用率和良好的用户体验。

网络切片主要是由虚拟化层中的网络功能网元根据用户需求组网形成的虚拟网络,详细示意如图 2 所示,其中虚线圈出的部分代表一个切片,例如图 2 中的切片 1、切片 2 和切片 3 等。

3.2 网络切片的定制过程

未来移动通信论坛发布的《5G 白皮书》中将未来 5G 应用场景划分成了三大类,分别是 mMTC(海量机器类通信)、eMTC(超可靠低时延通信)和 eMBB(增强移动宽带)。mMTC 和 eMTC 是具有不同侧重点的物联网通信的应用场景,其中,mMTC 代表的是人与物之间的通信,eMTC 代表的是物与物之间的通信。eMBB 是人与人之间通信的应用场景,主要是基于现有移动宽带业务场景,通过进一步提升用户体验性能来追求人和人之间的极致通信体验^[15]。这 3 个应用场景对于覆盖率、速度、时延、安全性等网络性能指标具有不同的要求,需要未来网络灵活构建,运营商对这些网络性能指标进行灵活组合和调整。如图 3 所示^[16],是根据 5G 场景需求以及空口技术定制化控制面和数据面的协议栈,其中,垂直的控制平面,使得在构建模块之间交互,以一个动态自动的方式去建立和运营一个虚拟网络;动态调度场景所需协议栈功能模块(图 3 中非阴

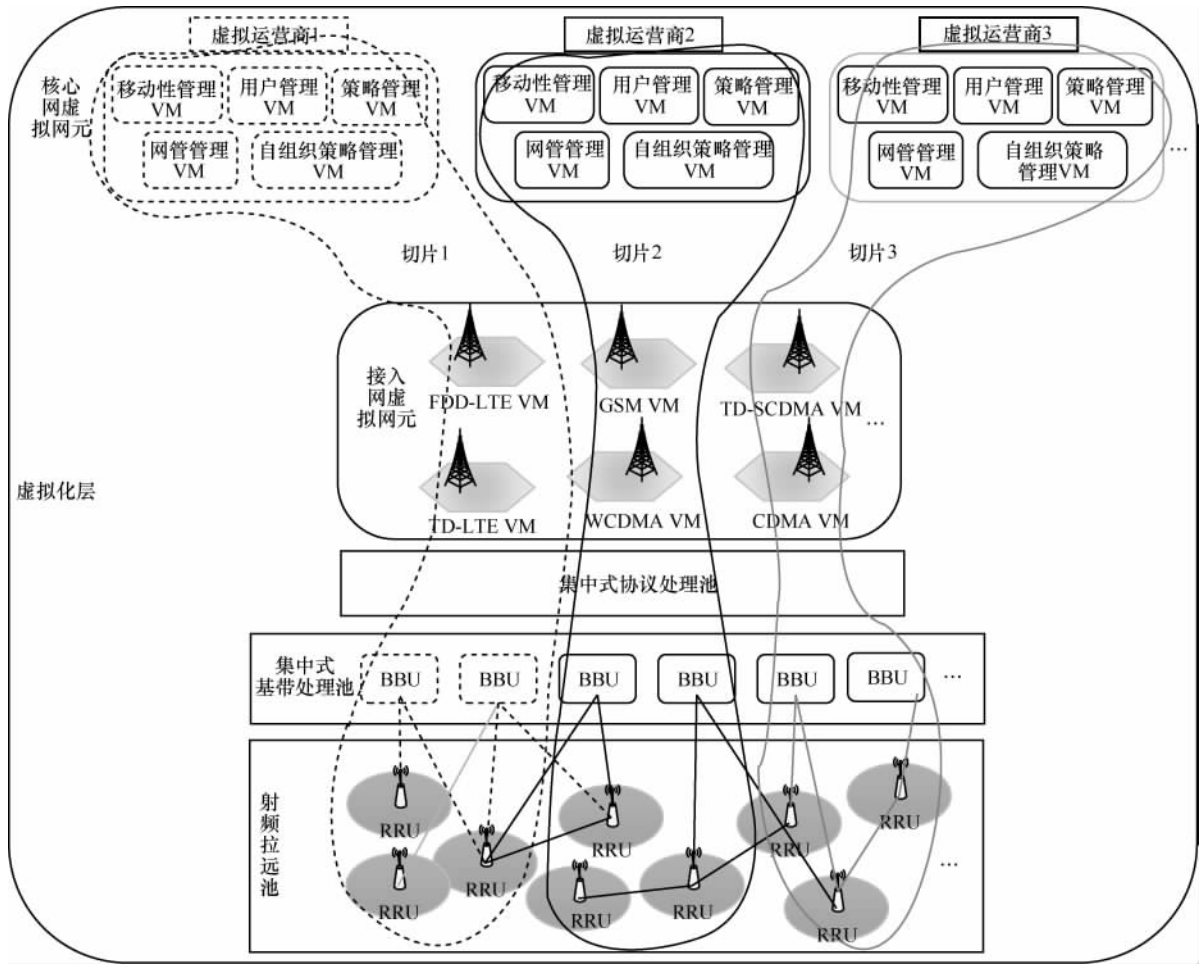


图 2 网络功能网元组网形成的网络切片示意

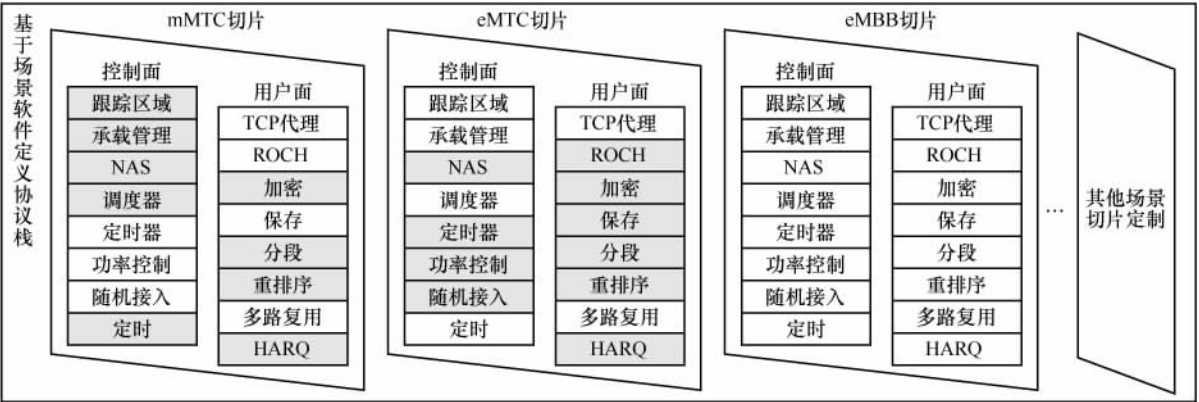


图 3 软件定义协议栈

影部分的功能模块),基于 QoS(quality of service,服务质量)指标需求,释放不需要的模块(图 3 阴影部分的功能模块),能够简化协议栈层级结构,高效的管理资源,提高资源的有效利用率,节省下来的闲置资源可以用来定制其他切片的协议栈。

如图 4 所示,展示了根据业务或场景特点定制切片的基本过程。比如车联网(切片 1)需要超低时延,视频网站(切片 2)需要高带宽能力,而银行业务(切片 3)则需要极高的网络可靠性,针对这些业务或场景的特点和需求生成具有特定控制面和用户面的固定切片;还可以根据用户特

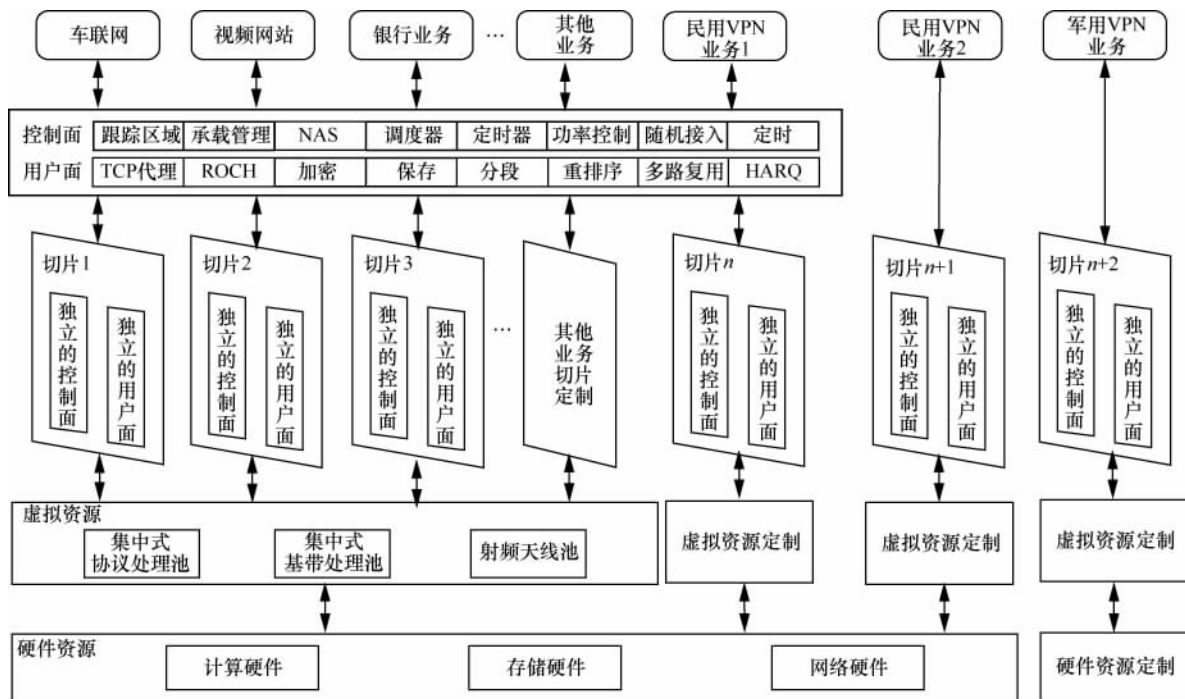


图4 网络切片定制过程示意

殊需求生成特定的切片,如图4中的切片 n 和切片 $n+1$,其中切片 n 的定制需求等级高于切片 $n+1$,切片 n 具有更多的资源可以共享,切片 $n+1$ 的隔离性高于普通切片和切片 n ,需要的安全机制的要求更高;定制化要求最高的是切片 $n+2$,此切片为军用切片,为了保证绝对的安全可靠的保密性,所有资源全部独享,不与任何切片共享。切片生成后通过SDN控制器与下层的硬件资源实现映射关系,动态地在物理资源间进行负载均衡,按需部署处理功能模块,实现硬件资源的共享,从而达到节约资源的目标。

4 网络切片实现所面临的挑战

网络切片作为5G代表性的网络服务能力之一,在未来移动通信中占据重要的地位,给传统的“一刀切”网络架构带来了有力的冲击。目前网络切片在标准化研究进程中处于起步阶段,3GPP(3rd Generation Partnership Project,第三代合作伙伴计划)预计会将切片的整体架构在2018年完成,而随着对网络切片逐步研究和试验的过程中发现网络切片还面临着诸多挑战,主要挑战如下。

(1)SDN方面

SDN控制器作为NS集中化控制的实现部分,会出现单点失效、易受网络攻击、负载过大等安全性问题,为了保证整个系统能够稳定安全的运行,需要建立一整套的

防护、隔离和备份和等安全机制,但是目前来还没有系统的解决方案;SDN控制器的南向接口存在多种选择,例如OpenFlow、BGP(border gateway protocol,边界网关协议)、SNMP(simple network management protocol,简单网络管理协议)等,主要采用OpenFlow协议,但是OpenFlow缺乏能力为3GPP/移动通信和部分供应商专有;现有的ASIC(application specific integrated circuit,专用集成电路)芯片架构都是基于传统的IP地址或以太网寻址和转发设计,SDN控制器下转发设备(计算硬件、存储硬件和网络硬件)的高性能无法维持;目前,SDN标准体系统一过程实施艰难,各大标准组织之间还存在着很大的争议,这给NS的通用化商用进度的推进带来了巨大的困难。

(2)NFV方面

NS架构与传统的电信标准化工作存在着很大的差异,MANO的标准化主要在管理接口方面,这涉及了多个开源组织和标准化组织,具有较大的实现难度;数据中心是移动通信网络的重要组成部分,新型数据中心可以为NS架构中的虚拟网元进行统一配置和管理,这部分还有待进一步深入研究;软硬件解耦后的移动通信系统在运行时要依靠强大的系统集成能力,与传统方式相比,解耦后的故障和运维处理具有很大的差异;NS网络架构中有基础设施组成的硬件资源 and 其所对应的虚拟

化资源池, MANO 初始化并设置新型网络服务, 从而实现网络生命周期管理、业务编排、虚拟资源需求计算及申请、网络资源管理和网络部署等功能, 这打破了现有的业务部署流程, 颠覆了现有设备的运维模式。

(3) OSS/BSS 方面^[17]

OSS/BSS 与新型网络的整合和交互能力是实现 NS 的一项重大挑战。利用 SDN 和 NFV 可以提高网络利用率, 提高网络的 QoS, 但是给服务管理带来一定影响, 急剧增加 OSS/BSS 的工作负担。NS 架构中的 NFV 基础设施需要动态地对网络资源重新分配, 满足各种新型服务的网络带宽、速度、流量和时延等需求, 但是目前的 OSS/BSS 无法支持这种实时的动态服务。

5 结束语

通过对目前电信网络存在问题的分析以及对 NS、SDN、NFV 等通信领域关键技术的研究, 提出了一种基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构, 该架构能够满足第三方需求而提供多样化和个性化的网络服务, 同时实现网络资源的共享与隔离。虽然当前的移动通信网络架构已经受到软件定义和虚拟化的冲击, 但是, 无论是在技术还是产业链等方面, 网络切片的实现仍然面临着诸多挑战, 网络架构中的各个功能模块还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] ABDELHAMID A, KRISHNAMURTHY P, TIPPER D. Resource scheduling for heterogeneous traffic in LTE virtual networks [C]//2015 16th IEEE International Conference on Mobile Data Management, June 5-9, 2015, Pittsburgh, PA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 173-178.
- [2] GUDIPATI A, LI L E, KATTI S. Radio visor: a slicing plane for radio access network [C]//The Workshop on Hot Topics in Defined Networking ACM, August 22-24, 2014, Chicago, USA. New York: ACM Press, 2014: 237-238.
- [3] 舒文琼. 爱立信: 5G 应用众口难调网络切片破解难题[J]. 通信世界, 2016(15): 44.
SHU W Q. Ericsson: 5G network applications difficult to reach slices solve the problems [J]. Communications World, 2016(15): 44.
- [4] HOFFMANN M, STAUFER M. Network virtualization for future mobile networks: general architecture and applications [C]//2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), IEEE, June 5-9, 2011, Kyoto, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [5] ITRI. Updates to solution 6.1.3: introducing network instance ID, S2-162666[R/OL]. (2016-08-30) [2016-08-30]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/WG2_Arch/TSGS2_115_Nanjing_China/Docs/.
- [6] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 网络架构设计白皮书[R/OL]. (2016-08-30) [2016-08-30]. http://www.catr.cn/kxyj/qwfb/bps/201606/t2016024_2173031.htm.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G network architecture design white paper[R/OL]. (2016-08-30) [2016-08-30]. http://www.catr.cn/kxyj/qwfb/bps/201606/t2016024_2173031.htm.
- [7] 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.
- [8] 中兴通讯股份有限公司. IMT-2020 核心网子组内容整合[R]. [S.l.:s.n.], 2016.
ZTE Corporation. Integrate the IMT-2020 core network sub-group documents[R]. [S.l.:s.n.], 2016.
- [9] 爱立信: 以 SDN 和云为依托“网络切片”实现 5G “网络即服务”[EB/OL]. (2016-08-30) [2016-08-30]. http://www.cww.net.cn/news/html/2015/12/17/201512171816461937_2.htm.
Ericsson: based “network slice” to achieve 5G “network that is services” based on SDN and cloud [EB/OL]. (2016-08-30) [2016-08-30]. http://www.cww.net.cn/news/html/2015/12/17/201512171816461937_2.htm.
- [10] 赵明宇, 严学强. SDN 和 NFV 在 5G 移动通信网络架构中的应用研究[J]. 移动通信, 2015(14): 64-68.
ZHAO M Y, YAN X Q. Research on application of SDN and NFV in 5G mobile communication network architecture [J]. Mobile Communications, 2015(14): 64-68.
- [11] Network functions virtualization-introductory white paper #3[R]. [S.l.:s.n.], 2014.
- [12] 孙茜, 田霖, 周一青, 等. 基于 NFV 与 SDN 的未来接入网虚拟化关键技术[J]. 信息通信技术, 2016(1): 57-62.
SUN Q, TIAN L, ZHOU Y Q, et al. Virtualization of access network in future RAN based on NFV and SDN [J]. Information and Communications Technologies, 2016(1): 57-62.
- [13] 宋菲, 侯乐青. SDN/NFV 标准及开源项目发展现状研究[J]. 信息通信技术, 2016(1): 63-67, 76.
SONG F, HOU Y Q. Research on the development of SDN/NFV standards and open source project [J]. Information and Communications Technologies, 2016(1): 63-67, 76.
- [14] NGUYEN V G, KIM Y H. Slicing the next mobile packet core network [C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), July 3-5, 2014, Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2014: 901-904.
- [15] 未来移动通信论坛. 5G 白皮书[R/OL]. [2016-08-30]. <http://bbs.c114.net/forum.php?mod=attachment&aid=MjU4NDU3fG14NmFiYWwM4fDE0NzI2MjQzh8MTE2MDUzMHw4MjU5OTc%3D>.



Future Mobile Communication Forum. 5G white paper[R/OL]. [2016-08-30]. <http://bbs.c114.net/forum.php?mod=attachment&aid=MjU4NDU3fGI4NmFiYWw4fDE0NzI2MjQzh8MTE2MDUzMHw4MjU5OTc%3D>.

[16] 华为技术有限公司. 定制化部署和服务[R]. IMT-2020 网络技术组第九次全体会议. 北京: 华为技术有限公司, 2016.

HUAWEI Technology Co., Ltd. Customized deployments and services[R]. [S.l.:s.n.], 2016.

[17] MANN. SDN 和 NFV 对 OSS/BSS 的影响[EB/OL]. [2016-08-30]. <http://www.sdnlab.com/16377.html>.

MANN. The impact of SDN and NFV on OSS/BSS[EB/OL]. [2016-08-30]. <http://www.sdnlab.com/16337.html>.

[作者简介]



安琪(1991-),女,河北工业大学电子信息工程学院硕士生,主要研究方向为未来移动通信网络架构与虚拟化技术。



刘艳萍(1966-),女,博士,河北工业大学电子信息工程学院教授,主要研究方向为DSP技术与FPGA技术。



孙茜(1990-),女,中国科学院计算技术研究所研究实习员,主要研究方向为虚拟化技术与天地一体化信息网络。



田霖(1980-),女,博士,中国科学院计算技术研究所副研究员,主要研究方向为绿色无线通信系统与无线资源管理技术。