



面向 5G RAN 的网络切片技术

王燊¹, 罗凤娅¹, 孙国林²

(1. 四川通信科研规划设计有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 网络切片作为软件定义网络 (software defined networking, SDN) 技术框架体系的核心内容, 已经成为 5G 网络演进过程中一项关键技术特性。同时, 5G 网络演进中的无线接入网络对泛在接入需求的进一步提升, 使无线资源管理也必定要围绕着资源虚拟化和设计切片化为重点展开技术演进。从无线网络切片技术的需求和功能场景定义出发, 讨论分析了网络切片技术在无线资源管理中的研究现状, 进而给出其在无线接入网络设计中所面临的挑战, 为后续研究和系统演进提供指导。

关键词: 无线接入网络; 5G; 网络切片; 网络功能虚拟化

中图分类号: TN802

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018093

Network slice technology in 5G radio access network

WANG Yi¹, LUO Fengya¹, SUN Guolin²

1. Sichuan Communication Science Planning and Design Co., Ltd., Chengdu 610041, China

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: As a core content in SDN (software defined networking) technical framework, network slice has become a key technology in 5G network evolving processing. In the meanwhile, radio resource management should be focused on virtualized resource and sliced design in the RAN (radio access network), which is being confronted with much more ubiquitous access in 5G evolution. Based on the technical demand and function scenario definition for network slicing in RAN management, the states of the art in radio resource management were discussed, and moreover, the challenges in RAN design were also proposed, which would perform references for the future research.

Key words: radio access network, 5G, network slice, network function virtualization

1 引言

随着 RAN (radio access network, 无线接入网络) 技术的快速发展以及不同 QoS (quality of service, 服务质量) 类型的业务扩展, 网络资源管理需要面对传输性能提高、承载类型扩展和管

理效率提升的挑战, 而网络切片可以有效地应对这些挑战。网络切片允许共享同一基础设施的运营者为切片配置网络以及定义具体功能, 并且可以根据运营者的策略通过 SDN (software defined networking, 软件定义网络)、NFV (network function virtualization, 网络功能虚拟化) 灵活地

动态创造以及撤销切片。这样不仅可以灵活地管理网络资源,通过只提供必要的网络资源以满足服务需求来极大地提高网络资源的利用率,并且可以对异构无线接入技术进行管理,因此,无线网络切片是一种使多种无线接入技术共存成为可能的重要的方法^[1,2]。

另一方面,由于5G网络中不同用户拥有明显的接入差异化需求。而要满足这种差异化需求,按照传统的方式部署一些独立的网络基础设施,不仅需要花费高昂设备成本,而且能源效率极低。因此,为解决这种高差异化需求,5G网络引入了网络切片概念。通过网络切片技术将单一物理接入网络划分成多个逻辑上的接入网络,承载这些逻辑接入网络拥有不同的资源、协议进程与承载能力,以满足不同用户的质量需求。与传统方式相比,由于网络切片共享物理网络基础设施以及可用资源,所以网络切片技术不仅提高了资源利用率,并且有利于提高能量效率。

再者,在无线传输中,频谱作为一种重要而稀缺的资源,各频段的使用场景已基本被规定完毕。无线网络的带宽与传输所用的频谱宽度直接相关。当前,频谱资源的固定分配方式导致了新网络制式所需带宽增长受限。无线带宽难以应对激增的移动数据流量需求,运营商普遍采用小区裂化(增加小基站等接入点)缩小频谱的共享范围^[3],从而承载更多的数据流量。然而,这种方式仍然难以满足迅速增长的流量需求,还可能带来严重的干扰以及巨大的能耗问题。无线网络切片的概念成为了一种重要的解决方法,通过将物理网络切片成几个逻辑网络,可以实现网络运营商间和不同系统制式网络间共享频谱资源,不仅可以达到获得网络资源利用效率提高的目标,并且可以有效降低成本以及诸如网络重耕和整体搬迁的运维人工消耗。

作为网络切片的资源管理控制器,如果处理不正确,会使部署和管理无线网络切片变得非常复

杂。目前,SDN是减轻这一任务的必要工具,该技术对于实现无线网络切片所需的灵活性和可编程性至关重要。FlowVisor^[1]是SDN发挥作用的一个很好的例子,在有线网络中,这种切片工具被用来实现切片和流的隔离。尽管在无线场景中资源管理的问题要复杂得多,但是基于流的切片和控制消息隔离的主要思想仍然可以在无线领域中使用。

而NFV则是无线网络切片的推动者。如果某些特定功能(如适配无线信道的编解码运算)可以从专有硬件中获取、虚拟化和集中运行,切片的创建和管理则可以更容易执行。以通用硬件集中运行无线信号处理功能的SDR(software defined radio,软件定义无线电),显然是一种NFV方法,另外,cloud-RAN(云化无线接入网络)^[2,4]则是一种SDR架构,其目的是从基站取出基带信号处理功能,将其放在云端。因此,通过SDR集中进行基带信号处理功能可以集中在通用硬件上运行,这种解决方案可以降低硬件成本并促进类似协作通信等无线新技术的部署。另一个例子是将NFV应用于LTE(long term evolution,长期演进)网络的EPC(evolved package core,演进分组核心)的工作^[5,6]。EPC是LTE系统的核心网络,由多个实体组成,这些实体的功能有:移动性、路由和转发、访问控制、计费等。这项工作的目的是在云端虚拟化所有这些实体的功能,将同一服务器上的某些功能分组以减少网络上的信令开销。

2 RAN切片定义及需求

2.1 RAN切片定义

RAN切片围绕着无线网络空口资源有很多不同的定义,依据不同的角度空口切片有如下定义。

(1) 服务质量切片

切片可以定义为分属不同用户的一组流,如图1(a)所示。在该定义下,切片可归类为用户服务质量切片,其目的是通过切片为用户来提供不同的服务并且确保用户服务质量。

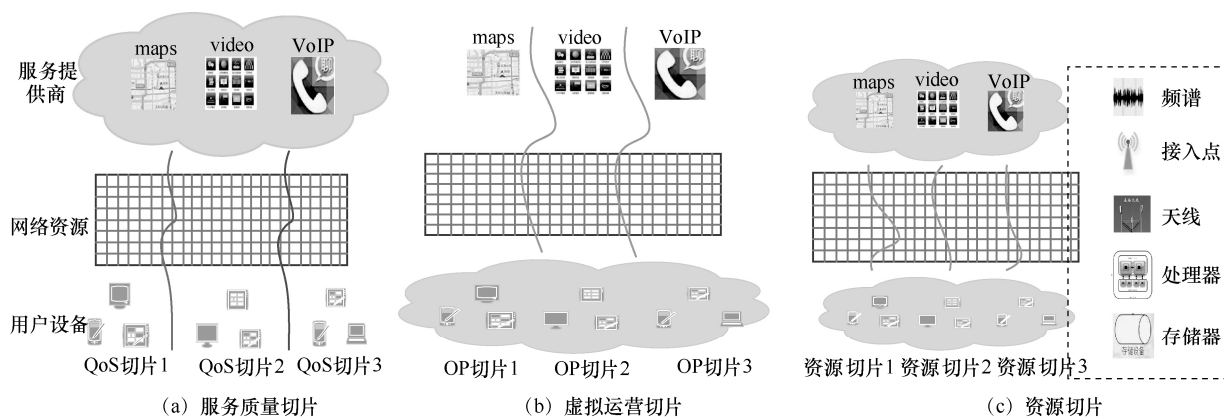


图1 切片场景

(2) 虚拟运营切片

切片可以定义为分配给虚拟网络运营者或服务提供者的网络资源的一个子集,如图1(b)所示。在该定义下,切片可归类为基础设施共享切片。这是一种网络虚拟化的传统观点被应用到无线领域的场景,该类切片目的将网络切片分配给虚拟网络运营者,虚拟网络运营者可以完全控制切片内网络基础设施以及网络功能。

(3) 资源切片

站在物理资源的角度可以定义资源切片,如图1(c)所示。资源切片可以进行如下分类^[7]:低层次的频谱级切片,即通过时间、空间、频率复用以及重叠接入等来对频谱进行切片,该类切片可被认为是连接的虚拟化;高层次的设备级切片,这是针对物理网络元素所进行的切片,如天线资源、基站资源、处理器资源、存储器资源等;更高层次的网络级切片,即对包含频谱以及物理网络元素的整个网络资源进行的切片。

2.2 网络切片对 RAN 的需求分析

(1) 最大化 RAN 资源利用

网络切片的目的是让一些不同的逻辑网络共享一套物理网络基础设施,根据不同的需求来提供不同的网络服务,从而可以避免因不同需求而建立新的网络基础设施带来的成本以及能量消耗问题。基于这个目的,RAN 应该为切片提供更有

效的资源利用以最大化网络切片优势。

(2) RAN 切片识别

当前的 3GPP (3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 网络支持扩展的 QoS 机制如承载,如 QCI (QoS class identifier, QoS 分类标识),可以为不同服务分配优先权值,通过优先权值来划分优先服务顺序。但是,这些现存的机制无法支持所有可能的切片场景,因此,RAN 需要对切片进行识别。例如可以通过提供 slice-ID 信息,在 RAN 与 CN (core network, 核心网) 间接口标识的扩展的个人数据分组来实现切片识别^[8]。

(3) 流量区分机制

网络切片一个主要的目的就是解决 5G 中业务差异化需求,因此,RAN 不仅需要识别不同切片以及流,并且要求提供一个可以划分无线以及传输接口上的流量的优先级顺序的机制。虽然,当前一些网络已经支持这种机制,但是 5G RAN 为了满足更广泛的业务种类,还需要引入与当前机制所拥有功能不同的一些其他功能。

(4) 切片保护机制

切片保护机制用来最小化切片间的负面影响,尤其是当切片共享无线资源(如无线信道)时,保护机制可以保障拥塞的一方不会给其他切片带来负面影响。当前,3GPP 系统有一些保护控制机制,如接入等级限制(access class barring)、

增强访问隔离 (enhanced access barring)、特定访问服务隔离 (service specific access barring) 等, 但是无法确认这些已有机制是否足以支持网络切片, 是否需要基于切片的接纳控制机制以提供足够的切片间隔离与保护。

3 网络切片对 5G RAN 设计的影响

5G RAN 的设计是目前一个非常重要的研究课题, 尤其是网络切片的引入对 5G RAN 设计的影响, 主要体现在 3 个方面: 对协议架构的影响; 对无线网络功能设计的影响; 对网络管理的影响。

3.1 协议架构

为了多切片可以共享同一个网络基础设施, 这些切片需要使用基于该基础设施的一套协议架构。由于网络切片一个重要目标就是支持不同的网络服务, 因此网络切片的引入会对这套共同协议架构的设计产生影响, 5G RAN 架构需要支持以下特征。

(1) 定制化切片

不同的服务可能有较大的差异化需求以及不同的特征 (流量、移动性), 如不同的切片可能有不同的 SLA (service level agreement, 服务等级协议), 这就需要 RAN 协议架构能支持不同切片拥有自己的协议功能以便支持自己的 SLA。

(2) 切片服务最优化

协议架构不仅需要支持差异化需求, 另一方面还需要通过专用切片功能优化来提供更好的服务。例如, 对于大数量设备随机接入情况, 在试图接入无线媒体的设备中引入基于优先次序的组方案可以明显地降低冲突比率。一种方式是基于组的媒体接入控制方案^[9], 在此方案中, 组间可以协调通信, 该方案极大地降低了接入冲突比率。

(3) QoS 体系扩展

QoS 体系也是协议架构需要改进一个主要方面。一个切片可能由多个拥有不同需求的服务组成, 在这种网络切片场景中, QoS 体系不仅需要

服务级信息, 还需要考虑到切片级信息。这种信息可以是具体的信息, 也可以是抽象的信息, 如 QCI、slice-ID 等。

(4) CN/RAN 功能解耦

CN/RAN 功能解耦是 3GPP 中关于 5G 系统平滑演进的一个重要设想^[10,11]。这种设想会允许 CN 与 RAN 独立改进, 从而加速新技术、新服务的引入, 并且能够处理多 CN/RAN 厂商协调工作。源于现存 S1 的通用 CN/RAN 接口 S1-M 可以促进 LTE 到 5G RAN 的整合^[12]。由于该接口需要潜在地支持不同的切片, 因此网络切片也会对该接口的协议设计产生影响。

3.2 无线功能组件

切片间有效地使用无线以及传输网络资源, 有利于 RAN 资源的共享目标。基于这一点, 一些无线功能组件包含两种情况, 一种是共同的功能组件, 另一种是独立的功能组件。对于不同切片的独立功能组件, 至少需要一些协调机制。这表明一个切片的功能组件的操作执行不可能与另一切片完全隔离。如一些场景中一组共同功能组件可以为上层提供切片服务, 也可能有很多与公共资源管理框架通信的独立功能组件。图 2 中以 Wi-Fi (wireless-fidelity) AP (access point) 切片为例, 可以看到租户 A 和租户 B, 即两个不同的切片共享一个切片调度器 (slice scheduler) 功能组件, 同时两个切片拥有自己的独立的 RRM (radio resource management, 无线资源管理)。因此, 租户 A 和租户 B 可以根据各自的 RRM 来满足不同的需求。

3.3 网络管理

(1) 切片追踪与优化

5G RAN 设计需要为每一个切片考虑 PM (performance monitoring, 性能监控), 该 PM 一般由计数器 (counter)、跟踪器 (trace) 以及关键绩效指标 (KPI) 构成。该 PM 可以确保满足 SLA 要求, 可以处理不同切片的不同服务要求。在 5G

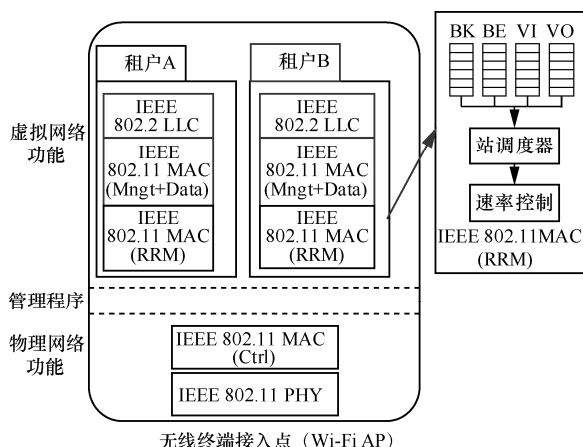


图2 无线接入节点内部切片架构

RAN 设计中，CM（configuration management，配置管理）的一些特征也需要调整，依据不同的切片所需要的配置可能不同。

（2）多切片资源共享

由于流量的动态变化特点，为了最大化承载，需要一种新的无线资源配置方案来更有效地使用无线资源，如给定一个包含多个小区的区域，在一个具体空口上的不同切片的流量会因为从一个小区到另一个小区的变化而变化，会伴随数据吞吐量潮汐变化（如在一场演唱会或者足球比赛之间与之后），一些区域处于拥塞，而周围的小区（cell）处于轻负载的情况很多。因此，5G RAN 设计需要考虑如何利用资源管理方案来更有效地处理这种情况。

4 虚拟无线资源管理

虚拟无线资源管理方案可以灵活地控制网络资源，一般可以归结为 3 方面的问题，即接入控制问题、资源分配问题、调度问题。处理资源分配问题时，要考虑到隔离的问题，隔离最基本的观点就是防止由于一个切片的变化（用户数量的改变、流或者信道情况的改变以及用户的移动性），或者新增切片删除切片而导致另一个切片的性能变差，由于无线介质的特殊性，要确保切片间的保护隔离也是一个巨大的挑战。

4.1 资源分配

对于无线网络上的切片，一个主要的问题是如何将资源分配给不同的切片^[13]。无线资源分配问题一般会考虑几个方面，首先是如何定义资源，其次选择一个划分资源的方法或者模型化资源的要求，最后设计一个资源分配机制。资源分配从层级水平可分为物理资源分配和虚拟资源分配。

（1）物理资源分配

通过对现有的 LTE 帧调度器修改为不同切片来分配一些 PRB，这种方式是物理资源的分配。基于这种 LTE 虚拟化框架，一个以基于多运营者共享同一物理基础设施为目的的虚拟化 LTE 基站的架构被提出^[14]。这种方法基于调度控制器（Hypervisor），通过 Hypervisor 控制不同虚拟节点，并且负责分配资源，它还要负责频谱的共享以及数据的复用。Hypervisor 主要完成两个任务：管理一个物理基站上的多个虚拟基站，在多个虚拟基站间调度物理资源；在不同的虚拟基站间调度无线资源。对于第二个任务来说，使用 PRB 作为最小的可分配资源粒度，分配 PRB 给不同虚拟基站而不是不同用户。依据先前准备好的定义来在各个虚拟基站上分配 PRB，该协定满足了不同虚拟基站拥有者的不同要求。这个协定可以设置不同的 PRB 分配策略：一个固定数量的 PRB（physical resource block，物理资源块）；根据当前估计需求来动态分配一个最大数量的 PRB；没有任何约定的最大努力分配。在 Hypervisor 分配 PRB 给虚拟基站后，每个虚拟基站再分配 PRB 给自己的用户。

与物理资源分配方式不同，参考文献[15]提出了一种将 LTE 网络切片分成几个被服务提供者拥有的虚拟逻辑网络的调度机制。对于每一个服务提供者（切片拥有者）需要与虚拟网络提供者签订一个协议，通过该协议来限定分配 PRB 的最小数量。该机制一个新颖的地方就是直接分配 PRB 给用户，但要遵循一个具体切片优化策略。该优化策略是基于一些限制条件，如不可超过基站总功率、

不同用户不能分配同样数量的 PRB、要保障每个切片的 PRB 数量不少于协定值以及保障用户的公平性等来最大化用户的传输速率。这种 PRB 资源分配一般要与虚拟网络提供者协定一个 PRB 的分配值。但是,对于切片拥有者来说,一般无法确定一个具体的 PRB 数量需求;并且可能因信道质量、速率的变化,无法拥有一个固定的 PRB 数量值。这种分配方式需要修改底层调度器,实现复杂度比较大。

(2) 虚拟资源分配

相比于物理资源分配方式,虚拟资源分配方式建立在更高的层次上,不需要修改底层的帧调度器,利用更高层次的调度机制来完成资源分配,这是一种基于所有资源片段为单位或者基于带宽保障来分配资源的方式。NVS 提出了一个切片 WiMAX 网络的架构和算法^[16],该方法所阐述的切片调度机制如图 3 所示,该机制在保证资源需求和带宽要求的同时,保持了切片间的隔离。

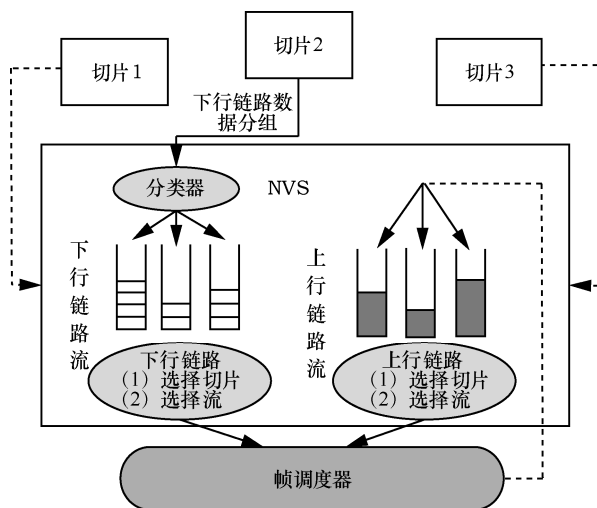


图3 NVS 使用场景

在该方法中,调度是通过修改位于相对于 PRB 调度更高层的 WiMAX 流调度器来执行的,调度器决定每一个时间粒由哪个切片使用传输资源;然后,每一个切片可以依据给定的资源根据不同的策略来调度自己的流用以发送分组给帧调度器。因此,帧调度器没有像 PRB 调度一样被更改,不过基站的 MAC (media access control, 媒

体访问控制)层需要修改。

4.2 资源调度

无线资源管理会极大地影响无线接入网络的虚拟化,灵活的调度机制有利于为不同切片或用户动态分配资源^[17],可以有效地改进无线资源管理。

NFV 技术不仅可以有效地共享硬件和其他核心网络资源,而且能更有效地利用频谱资源。根据其业务需求和其他 QoS 指标,虚拟化能够动态地向 SP (service provider, 服务提供商) 分配资源,从而有效地利用物理资源,如图 4 所示。在图 4 中,在每个传输时间间隔 (transmission time interval, TTI), 每个 SP 至少能够获取一定数量的资源块,然而剩下资源块根据每个 SP 的要求进行分配。

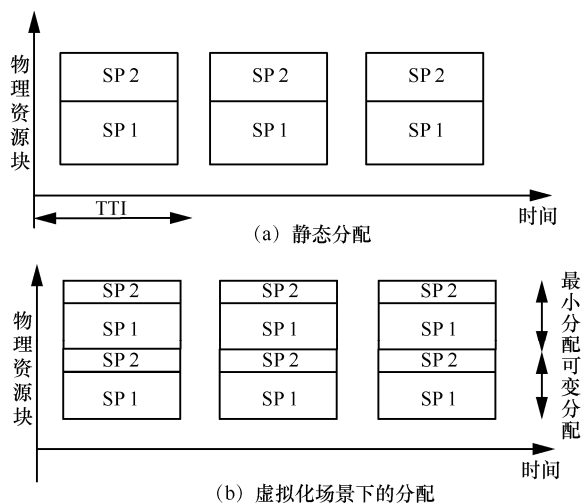


图4 静态和虚拟化场景下的资源分配

4.3 接入控制

传统 RAN 中,接入控制是一个允许或者拒绝用户访问网络资源的控制方法,通常基于用户的账户或者用户所属的某个组。无线网络系统的资源管理中,接入控制是必不可少的,它对于避免业务量负荷过载、保证系统的稳定性至关重要。接入控制的目的是:接入或拒绝用户的呼叫请求;尽可能避免系统过载;根据干扰和无线资源测量来决定是否接入;优化网络收益。与传统 RAN 相比,引入网络切片的 5G RAN 中,接入控制不仅考虑用户的接入控制,并且要考虑切片的接入控



制。Jiang 等^[17]提出了一个基于双优先级的接入控制机制，如图 5 所示。该机制通过切片间优先级来决定优先服务哪些切片，即允许哪些切片的接入。该切片间优先级是虚拟网络提供者与切片拥有者（服务提供者）协商制定的。该机制会依据切片内优先级（不同用户的不同服务需求）以及切片内用户 QoE（quality of experience，体验质量）来得到一个新进入虚拟网络的用户的一个接入可能性，从而控制用户的接入。

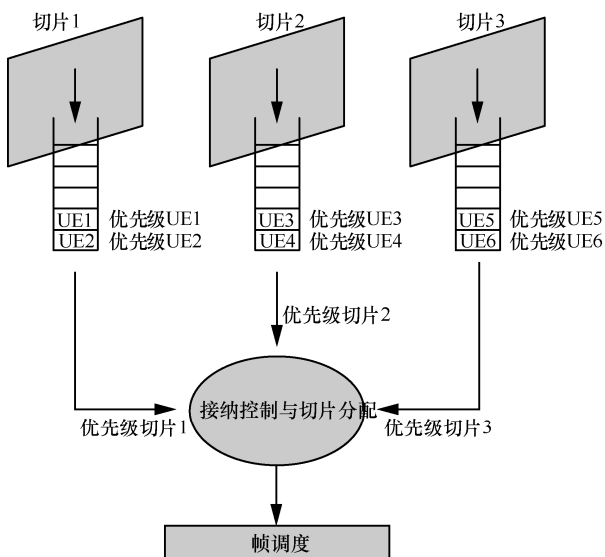


图 5 基于双优先级的接入控制机制实施场景

5 RAN 切片面临的技术挑战

网络切片试图通过将单个物理网络切割成多个虚拟的端到端的网络，使每个虚拟网络之间，包括网络内的设备、接入、传输和核心网，形成逻辑独立关系，任何一个虚拟网络发生故障都不会影响到其他虚拟网络。每个虚拟网络具备不同的功能特点，面向不同的需求和服务。同时，网络切片和网络虚拟化使 5G 网络具有多宿主/虚拟运营商，将改变传统的运营模式，从而构建以虚拟运营、大数据运营为代表的新商业模式。

为了适应未来广泛灵活的网络业务需求，网络切片化要求无线接入侧也应该以无线资源管理为核心内容的 RAN 设计做出相应调整，以满足自顶向下

的业务切片化部署要求。但是，考虑到空口侧无线资源受频率、地理、人群和业务的影响，无线网络虚拟化切片设计已经成为一个极具挑战性的任务，在进行虚拟化切片设计时，将着重考虑以下的技术突破。

（1）RAN 切片的隔离问题

由于随机接入方法使虚拟切片的隔离变得非常复杂，目前还没有被充分研究。隔离的很多方面如可变的流量、移动性、可变的信道承载也没有充分调查，所以设计一个有效的、确保隔离性的切片机制仍然是一个巨大的挑战。

（2）切片与无线技术解耦问题

不同无线接入技术拥有不同的空口、频谱、协议，如今还没有一个统一的方法来处理上述因素。因此，是否能脱离无线技术来实现无线切片的资源分配与隔离是一个巨大的挑战。

（3）真实部署问题

仅有很少的研究在实际网络中部署以及测试其切片方案，在无线领域，执行一个真实的部署用以评估解决方案非常重要。例如，在实际部署中多 AP 情况会带来新的问题，诸如控制节点的分配与组网等，并且需要考虑选择何种水平级切片。

（4）用户移动性以及干扰问题

用户移动性是无线网络的特点，这个特点会给切片带来巨大挑战。移动性不仅会影响节点连接承载能力，而且会使不同节点承载的用户数量发射明显的变化，这让管理变得非常复杂。无线网络不得不处理用户移动性切换，并且确保不会因用户位置而影响用户服务质量。

（5）用户接入控制问题

不同的无线接入技术拥有不同的接入控制方式，终端用户的接入控制也会极大影响无线资源的切片性能。

（6）无线管理功能与配置

多数无线设备拥有复杂管理功能，包括驱动编程以及底层软件。当多切片共享一个物理基础设施时，这些功能应该小心使用，以防止发生因

使用命令而导致切片冲突。

(7) 新技术兼容性

为了满足无线网络新增的需求, 其他新技术也在不断出现, 如密集分流(extreme densification and offloading)技术。如何将切片技术与其他新技术融合也是一种挑战。

6 结束语

本文围绕网络切片化对无线接入网络中无线资源管理所带来的一系列问题, 从无线网络资源切片化和资源管理虚拟化技术需求出发, 着重讨论并分析了网络切片化对5G无线网络设计中的技术影响, 从而进一步提出无线网络切片化所面临的技术调整及突破方向, 为后续研究发展提供参考。

参考文献:

- [1] SHERWOOD R, GIBB G, YAP K K, et al. Can the production network be the testbed?[J]. Usenix Symposium on Operating Systems Design&Implementation, 2010: 365-378.
- [2] CHEN C. White paper of China mobile research institute: C-ran: the road towards green radio access network[R]. 2011.
- [3] 周逸凡, 赵志峰, 张宏纲. 基于智能SDN面向5G的异构蜂窝网络架构[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 28-35.
ZHOU Y F, ZHAO Z F, ZHANG H G. Isomeric cellular network architecture based on Intelligent SDN oriented 5G[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 28-35.
- [4] HADZIALIC M, DOSENOVIC B, DZAFERAGIC M, et al. Cloud-ran: innovative radio access network architecture[C]// 55th International Symposium ELMAR, Sep 25-27, 2013, Zadar, Croatia. Piscataway: IEEE Press, 2013: 115-120.
- [5] 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.
- [6] 曲桦, 栾智荣, 赵季红, 等. 基于软件定义的以用户为中心的5G无线网络架构[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 36-40.
QU H, LUAN Z R, ZHAO J H, et al. A user centric 5G wireless network architecture based on software definition[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 36-40.
- [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] DEUTSCHE T. Deutsche Telekom's view on 5G[S]. 3GPP RAN 5G Workshop, 2015.
- [9] KONSTANTINOS C, ALEXANDROS K, PANAGIOTIS S, et al. On the way to massive access in 5G: challenges and solutions for massive machine communications[C]//4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (Crown Com), Jun 22-24, 2009, Hannover, Germany. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 708-717.
- [10] SILVA I D, MILDH G. Tight integration of new 5G air interface and LTE to fulfill 5G requirements[C]//IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 11-14, 2015, Glasgow, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [11] HUI J Y. Resource allocation for broadband networks[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1988, 6(9): 1004-1011.
- [12] ZAKI Y, ZHAO L, GOERG C, et al. LTE wireless virtualization and spectrum management[C]//Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010 Third Joint IFIP, Oct 11-15, 2010, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [13] ZAKI Y L, ZHAO L, GOERG C, et al. LTE mobile network virtualization[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(4): 424-432.
- [14] KAMEL M I, LE L I, GIRARD A. LTE wireless network virtualization: Dynamic slicing via flexible scheduling[C]// 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Sep 14-17, 2014, Vancouver, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [15] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG H. NVS: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(5): 1333-1346.
- [16] 林晓勇, 朱园园, 梅杰, 等. 一种SDN中用户群博弈的OpenFlow流调度策略[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 46-52.
LIN X Y, ZHU Y Y, MEI J, et al. A OpenFlow flow scheduling strategy for user group game in SDN[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 46-52.
- [17] JIANG M, CONDOLUCI M, MAHMOODI T. Network slicing management & prioritization in 5G mobile systems[C]// European Wireless Conference, Jan 24-27, 2016, Dezhou, Austen. Piscataway: IEEE Press, 2016.

[作者简介]



王燚(1975-), 男, 博士, 四川通信科研规划设计有限责任公司高级研究工程师, 主要研究方向为无线网络接入与泛在移动通信系统, 曾参与过3GPP LTE无线系统标准预研、MBMS、中继、CRAN无线系统关键技术应用研究。

罗凤娅(1988-), 女, 四川通信科研规划设计有限责任公司高级研究工程师, 主要研究方向为移动通信网络网优规及物联网应用研究, 曾参与过多家运营商网络专项规划。

孙国林(1978-), 男, 博士, 电子科技大学计算机学院副教授, 主要研究方向为软件定义网络、网络虚拟化及物联网应用, 曾参与过3GPP LTE无线系统标准预研、认知无线网络关键技术应用研究。