



专题:5G

基于智能 SDN 面向 5G 的异构蜂窝网络架构

周逸凡,赵志峰,张宏纲

(浙江大学信息与电子工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:首次提出了智能 SDN(软件定义网络)的概念和架构,解决了以往 SDN 系统缺乏智能化的问题。通过与蜂窝网的结合,提出了基于智能 SDN 面向 5G 的异构蜂窝网络总体架构,实现对无线接入网和有线核心网的统一管理。基于智能 SDN 的管理和协调,在无线接入部分提出控制和数据分离、上行和下行分离、无线资源动态适配等技术,提高频谱效率和能量效率;在核心网部分实现高效的内容分发以及快速的网络安全防护策略,增加数据吞吐率以及网络可扩展性。同时,通过无线接入网和核心网之间的资源共享和联合优化,提供网络功能虚拟化和个性化业务定制,实现智能 SDN 系统与异构蜂窝网络的深度融合。

关键词:智能 SDN;异构蜂窝网;5G;深度融合

中图分类号:TN929.53

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016163

Towards 5G: heterogeneous cellular network architecture design based on intelligent SDN paradigm

ZHOU Yifan, ZHAO Zhifeng, ZHANG Honggang

College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: To enrich the SDN (software defined networking) with intelligence and learning capability, an intelligent SDN paradigm was proposed for the first time. Combining it with the traditional cellular networks, 5G-oriented heterogeneous cellular network architecture based on the intelligent SDN was set up, which made the integrated management of radio access networks and core networks possible. Based on the management and coordination of intelligent SDN, the decoupling of control and data, decoupling of uplink and downlink, and dynamic resource utilization in radio access networks to improve the spectrum efficiency and energy efficiency were put forward; content caching and network security strategies were deployed in the core networks to enhance the network scalability and data throughput. Globally, the resource utilization in radio access networks and core networks was optimized to achieve the network function virtualization and customized service provision, which contributed to the in-depth combination between the heterogeneous cellular networks and intelligent SDN.

Key words: intelligent SDN, heterogeneous cellular network, 5G, in-depth combination

收稿日期:2016-05-10;修回日期:2016-06-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2012CB316000);浙江省重点科技创新团队“软件定义网络技术与应用创新团队”项目(No.2013TD20)

Foundation Items: The National Key Basic Research Program of China(973 Program)(No.2012CB316000), Program for Zhejiang Leading Team of Science and Technology Innovation (No.2013TD20)

1 引言

近年来,随着无线智能设备的不断普及,蜂窝网络的流量增长呈现加速发展趋势^[1]。为了满足大规模的无线覆盖、多样化的终端接入、多种业务承载的差异化容量需求,无线蜂窝网的部署也呈现出异构、融合、多样化的趋势^[2,3]。为了满足未来蜂窝网络(如 5G)的覆盖需要,需要从更高层次、更宽视角来着手设计系统架构^[4],比如动态和智能控制机制的引入、接入网与核心网的融合、无线接入方式的优化以及传输资源的动态分配等。

软件定义网络(software defined networking, SDN)是近年来网络通信领域的一项新兴技术,它通过实现控制与数据分离、集中化管理调度、开放可编程接口,正在推动通信网络向新一代演进。将 SDN 与移动蜂窝网络结合,也受到了普遍关注。美国斯坦福大学和贝尔实验室研究组在 2013 年提出的 SoftRAN 架构^[5],在接入网中提出大基站的概念,其中包括集中式的控制器以及分布式的无线接入单元,通过软件编程的方式实现在一定区域范围内的资源集中调度和配置管理。美国普林斯顿大学和贝尔实验室研究组在 2013 年提出的 SoftCell 架构^[6],将 SDN 技术引入移动蜂窝网的核心网中,通过引入集中控制器,完成控制面与转发面的分离,简化核心网中复杂的网元设备,并且能够实现针对不同用户、不同应用的流量转发规则定制和网络安全策略选择。西班牙学者在 2014 年^[7]提出,在无线移动异构网中引入 SDN 控制器并和虚拟化技术相结合,在控制面提供相应功能接口,并且在用户面提供灵活的流量调度。国内一些科研机构也对此展开了相关研究,清华大学在 2013 年提出的 OpenRAN 方案^[8],引入云化资源池的概念,同时利用虚拟化技术来实现软件定义的无线接入网,能够提供完整的可编程性质,使蜂窝移动网更加灵活可控。另外,清华大学课题组提出的在超蜂窝架构下的软件定义接入方式^[9],通过把基站分为控制基站和流量基站,实现控制面和数据面的分离,并且在控制基站上引入 SDN 控制器功能,利用全局信息对其他流量基站进行资源动态调配。

现有的研究虽然在不同的侧面将 SDN 与移动蜂窝网络进行结合,却没有充分考虑无线蜂窝网络不同于有线网络的特殊之处。一方面,无线蜂窝网在接入端不仅具有异构多样性的特点^[2,3],而且时刻面对复杂多变的信道环境和干扰环境,同时要服务于大量的、行为习惯各不相同的移动用户,解决瞬时变化的流量需求,这给集中化的管理、决

策和控制带来了极大的挑战。另一方面,在核心网一侧,为了实现各种网络相关功能的处理,集中化的管理、决策和控制也在灵活性、可靠性、实时性等方面遇到了挑战。还有,现有的融合方案没有将接入网和核心网部分纳入统一的软件定义管理和控制之下,仍然无法解决目前移动蜂窝网络面临的协同困难的问题。面对未来愈加复杂的异构移动蜂窝网络覆盖场景、愈加复杂的多业务承载需求、更加扁平化的融合网络架构,必须对现有的 SDN 架构进行全面改进才能真正实现与下一代蜂窝接入网和核心网的融合。首先,要在 SDN 的架构中引入智能分析和决策机制,以满足复杂控制和管理的需要;其次,要充分利用 SDN 全局化和集中化管理的优势,实现异构层叠覆盖基站间的协同,创新接入机制,提升频谱和能量效率;再次,要充分利用 SDN 在核心网的工作模式优势,实现对更多控制网元、功能网元的交互和协同,在可提供网络虚拟化和支持分片功能的同时,提供更加智能的协同管理和控制;最后,要实现接入网和核心网在统一 SDN 管理架构下的无缝融合。这些问题对未来蜂窝网络的架构设计、核心技术研究、部署和运营服务将产生重要影响,意义重大。

2 系统架构

目前的 SDN 技术实现了控制面与数据面的分离,上层应用通过控制器向下层转发设备下发流表项进行高效的数据转发。复杂的策略控制和转发路径选择都有控制器完成,其三层架构如图 1 左侧所示。

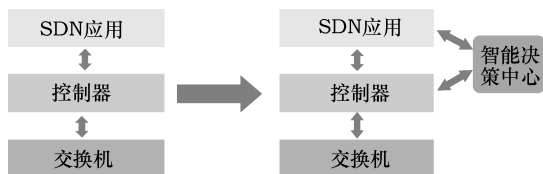


图 1 SDN 向智能 SDN 的演进

2.1 智能 SDN 架构

随着上层应用的不断丰富,网络规模的不断扩大,SDN 对控制器的控制能力要求越来越高。为了解决这个性能瓶颈,亟需在控制器之外增加一个具有复杂计算能力、智能策略选择功能的新模块,它在帮助控制器完成复杂决策功能的同时,通过搜集大量实测数据进行自主学习,不断完善对整个网络的状态监控,以便快速高效地实现功能部署和问题预警。

如图 1 右侧所示,提出了智能 SDN 的新架构,引入智



能中心的概念。智能中心可以基于云平台来构建,具有海量存储、海量计算能力,并可以根据需要部署不同的智能引擎,如面向用户行为分析、面向流量工程、面向网络信息安全防护等。其结构如图2所示。

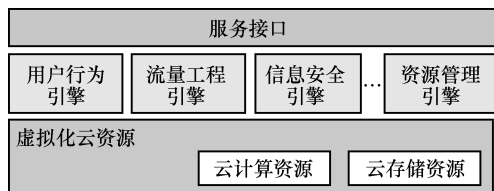


图2 智能 SDN 中智能中心的结构

2.2 基于智能 SDN 的异构蜂窝融合网络架构

有了智能中心的支撑,SDN 能够和异构蜂窝网络进行全面的融合,从而实现接入网和核心网各自的高效控制和联合优化。整体架构设想如图3所示,基于智能 SDN 的异构蜂窝融合网络系统在逻辑上分为基础设施层和决策控制层。其中,基础设施层包括无线接入网和核心传输网;决策控制层包括接入网控制器、核心网控制器、业务总体控制器以及智能决策中心。

(1)基础设施层

在基础设施层中,无线接入网通过基站和核心传输网连接,核心传输网通过数据网关与外部的 Internet 相连。在无线接入网中,存在多种接入方式,既有传统的蜂窝网基站(包括 LTE 或 UMTS、宏基站或微基站),又有覆盖范围极大的广播基站和小范围覆盖的 Wi-Fi 接入点,不同的接入方式体现了未来蜂窝网的异构趋势。在逻辑上,各个无线接入点在接入控制器的控制下,在不同的场景中,可以实现用户和基站的多种接入方式,比如控制与数据分离、业务数据上下行分离、多点协同传输等。在核心传输网中,包含各种网间设备、交换机、路由器、内容存放节点和网络安全设备,它们统一通过 SDN 的南向接口接收核心控制器的管理,通过流表项的更新实现恰当的路由转发、高效的内容存放和智能的安全策略等。

(2)决策控制层

在决策控制层中,接入控制器、核心控制器和业务总体控制器都通过 SDN 的东西向接口相互连接,完成用户请求或业务要求的各种信令传输。同时,它们各自通过服务接口和智能决策中心相连,上传数据记录,获取基于各种功能引擎实现的快速决策结果。具体地,当用户请求通过接入点上传到决策层,业务总体控制器可以根据用户请求的业务类型分别向接入网控制器和核心网控制器提出

相应的功能需求,接入网控制器和核心网控制器在收到相应的功能需求后,根据自己管理的资源,匹配出相应的服务策略,并且以控制信令的方式通知下层的基础设施层实现相应功能。比如,对于车联网业务,同时具有高移动性和时延敏感性的特点,业务总体控制器在得知这类业务请求时,通过用户鉴权和资源适配,向接入网控制器提出大范围覆盖和低时延的功能要求,向核心网控制器提出低时延高可靠性的功能要求。在接到功能要求后,接入网控制器采用分离策略,分配 LTE 的宏基站满足车辆的上行连接,实现大范围覆盖,减少切换次数,分配广播基站进行下行传输,根据用户需求相似的特点实现内容的统一传输。同样,核心网控制器在接到功能要求后,在核心网为车联网业务选择快速的转发通道,高可靠性地纠错传输。在整个控制决策过程中,各个控制器可以收集业务流的行为特征上报给智能决策中心,智能决策中心可以为每一位用户、每一类业务维护一个知识库,并利用学习算法不断更新,当各个控制器在决策过程中遇到任何困难时可以向智能决策中心发起决策请求,并得到基于可扩展的功能引擎实现的快速响应。

3 应用案例

传统的蜂窝网为了保证大量用户的移动性和满足不同业务的 QoS 需求,无线接入网和有线核心网都设计得十分臃肿,并且整个系统需要一套复杂的控制流程。比如,在无线接入侧,为了实现用户的无缝切换,新旧基站和服务网关节点(serving gateway, SGW)需要多条交互信令,并且需要通过 GTP(GPRS tunneling protocol)来完成,这造成一定的资源浪费;又比如,有线核心网内的数据网关节点(PDN gateway, PGW)作为流量汇聚节点,需要同时处理上百万用户的数据传送和控制信令,这使得它造价昂贵并且难以扩展。通过引入智能 SDN,通过控制器来协调各个无线接入点和核心网元设备,借助智能中心强大的信息库和计算能力,能够在完全分布和绝对集中两种方式之间取得较好的平衡,高效并且准确地管理用户接入和数据传输,处理新型的大规模网络应用,比如内容分发和网络安全。

3.1 无线接入侧

在目前的蜂窝网无线接入中,主要还是秉承以基站为中心的接入策略,比如用户的控制面和数据面消息都耦合在同一个基站节点上,同样对于上行链路和下行链路也是如此。但实际上,控制面和数据面、上行与下行在通信过程中所占比重并不均衡,理想情况下应该对它们进行区别对

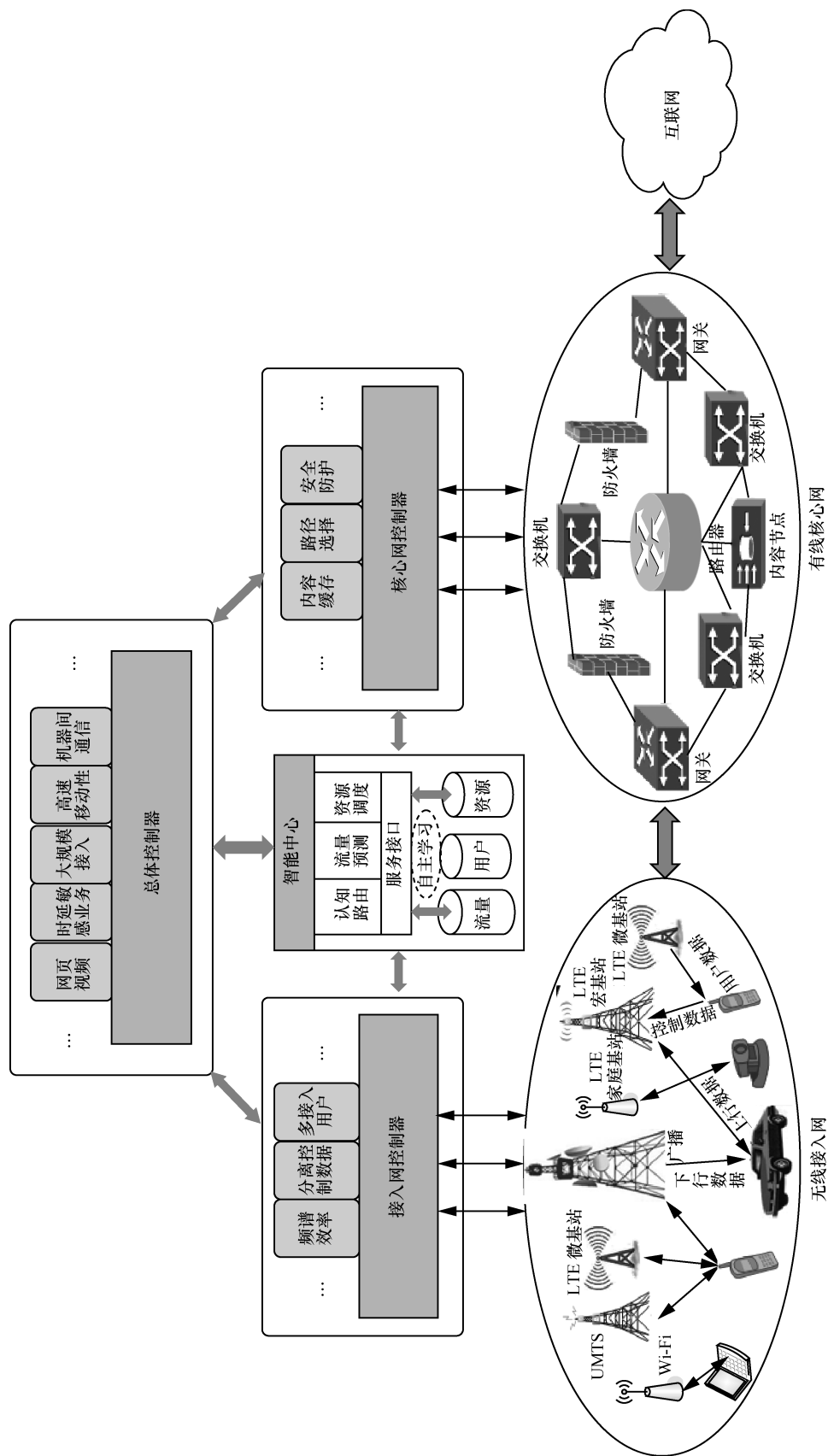


图 3 基于智能 SDN 的异构蜂窝融合网络架构设想



待。由此带来的用户接入选择问题、频谱资源调度问题,涉及大量需要协调和管理的信令流程,智能 SDN 能够根据用户和基站的上报信息统一协同控制信令、数据传输、基站资源、用户行为等,从而可以支持动态资源分配、快速切换、基站休眠等新功能。考虑到系统扩展性,多个 SDN 控制器可以在一个智能中心的支持下工作,实现大范围、跨域的分离策略。

3.1.1 控制与数据分离

传统的蜂窝网用户接入策略中,单个用户相关的控制信令和数据信令同时耦合到同一个基站节点上,这极大降低了移动蜂窝网的能量效率^[10]。同时,针对未来的小基站或微基站,要处理长连接的信令,需要解决切换等问题,不经济也不科学。采用控制面与数据面分离的策略,宏基站提供信令连接,微基站仅处理数据功能,将可以极大地提高效率,并能够实现对用户的有效管理。在智能 SDN 的框架下,控制基站和数据基站都可以看成 SDN 控制器下的一个交换节点,控制器可以根据信道状况、业务需求和网络整体负载,为用户配置适当的接入方式。

3.1.2 上行与下行分离

传统的蜂窝网用户接入策略中,用户的上行和下行链路都是和同一个基站相连接,常用的方法是用户根据下行接收信号强度来选择关联基站^[11],但是在层叠覆盖的情况下,同一个基站无法提供最优的上下行带宽。此时可以采用上下行分别接入不同最优基站的方式进行优化,如下行使用基于参考信号接收功率的准则,上行则接入距离最近的基站^[12]。上下行分离策略虽然可以使用户的上行和下行接入选择分别达到最优,但需要集中控制设备的支持。在智能 SDN 框架下,用户和基站需要上报信号强度、信道状况、位置等信息,智能中心将协助接入网控制器完成接入策略的选择并指示基站控制用户接入。

3.1.3 无线资源动态适配

面对越来越复杂和密集的异构蜂窝网络部署,基站之间的无线干扰问题也越来越突出,这严重制约了蜂窝网络的容量提升。基于智能 SDN 的框架,可以集中地采集基站的无线资源使用情况、干扰情况和负载需求情况,通过智能决策,对无线资源进行弹性匹配,最大化网络整体吞吐率和效能。虽然蜂窝网络的用户位置和流量需求随时间不断变化,但是它们也呈现出一定的可预测性的特点^[13],如果能够实现在时间和空间上对用户行为进行精准预测,这

将能够使有限的无线资源发挥出更为出色的服务效果。智能 SDN 预测算法可以根据历史数据记录,对用户的行为、运动、流量进行预测,预先匹配合适的无线资源。在智能中心内,通过安装可扩展的机器学习算法(如强化学习、转移学习等)^[14],对大范围内的无线资源使用信息进行分析,辅之以对用户流量需求的准确预测,从而达到使总体网络资源分配最佳的联合优化。

3.2 有线核心网

在蜂窝核心网部分,目前部署的 4G 网络都是采用分组交换进行数据传输,相比于传统的电路域实现更加简单和高效。然而,随着用户对互联网内容的海量实时需求,传统的通过网关向 Internet 获取内容并基于隧道协议传送给移动终端的方式,已经无法提供足够的容量和时延要求。另一方面,随着蜂窝网与互联网的不断融合,传统的有线网络安全问题也将蔓延到蜂窝核心网,例如大规模的网络攻击和移动终端劫持。为解决以上问题,核心网各网元之间需要进行高效协调和统一管理,并且大规模的内容需求数据和网络攻击记录也需要进行分析和决策,智能 SDN 架构的引入能够在提高网络吞吐率的同时给网络部署带来智能化的解决方案。

3.2.1 高效内容分发

内容分发技术是目前互联网研究重要的领域之一,它在目前的互联网基础设施之上构建了一张层叠(overlay)网络,通过内容分发网络(content delivery network, CDN)、内容缓存等技术实现内容的有效分发并提升用户的体验。CDN 与智能 SDN 结合,一方面可以解决高效的边缘服务器选择问题,另一方面可以解决服务过程中边缘服务器的动态切换问题,将是对目前 CDN 架构的极大提升^[15]。内容分发与蜂窝网络融合,可以充分利用蜂窝网络“广播信道”的属性,融合广播多播机制和内容缓存机制,提供最优化的方案。通过将 CDN、边缘缓存等机制结合,基于蜂窝网无线广播的属性,在智能 SDN 的控制下,统筹协作 CDN 和边缘缓存机制,统筹协作单播、多播、广播机制,将为未来移动互联网的内容分发提供一个全新的架构。

3.2.2 网络安全防护

分布式拒绝服务(distributed denial of service, DDoS)攻击借助于被感染的庞大僵尸终端网络,联合起来对一个或多个目标发动拒绝服务攻击,从而成倍地提高拒绝服务攻击的威力^[16]。随着移动终端设备的计算能力越来越强,移动设备作为僵尸节点来组建僵尸网络正逐渐成为现实

威胁。在智能 SDN 架构下,互联网域向蜂窝网络边缘延伸,需要将蜂窝网络基站、网络控制设备、网络转发设备等纳入抗 DDoS 攻击的统一策略控制之下。一方面是攻击监测,另一方面是攻击解决。在智能 SDN 架构下,终端、基站、控制和转发设备可以根据智能 SDN 的需要,按照策略进行网络流量特征采集和上报,智能中心将集中判断攻击行为是否发生。如果判断攻击行为发生,可以采取已有的安全策略^[7],通过全局拓扑的感知和流量分析来锁定攻击的锚节点,下发攻击解决策略给这些锚节点(基站、路由器或控制器等),在锚节点将攻击流量丢弃或阻塞。

3.3 接入网与核心网的深度融合

在当前的蜂窝网络中,无线域与 IP 域是完全分离的,IP 域与互联网域也是完全分离的。无线域与 IP 域通过隧道联接,IP 域与互联网域通过网关联接。这会带来效率不高、资源浪费、控制不灵活、无法实现统一控制等一系列问题。面向未来的移动蜂窝网络应用,需要承载海量、高实时、大连接等多方面的业务,分离的隧道和网关方案已经无法满足要求,必须要通过 IP 域和互联网域向蜂窝网络边缘的延伸来解决。为了实现无线接入网和有线核心网的深度融合,需要智能 SDN 的全局协调和统一管理以及基于业务数据统计分析的及时智能决策。

3.3.1 资源联合调度

用户通过基站、核心网网关与互联网建立数据连接。用户和基站之间的连接涉及无线资源的分配,基站到数据网关之间的连接涉及有线链路的分配,这些资源的分配都涉及全局的性能优化(无线侧涉及总体的干扰水平,有线侧涉及网络的总容量和整体时延)。另外,不同的业务有不同的 QoS 要求,不同的用户有不同的鉴权等级,需要分配不同的无线资源和链路带宽。同时,在传输效率上,用户的内容请求可能具有相似性,这给无线端提供了多播和广播的可能以及核心网中热门内容存放的决策。为了达到这种按需服务的效果,整个蜂窝网需要具有全局调控、统一管理和易于扩展的能力。在基于智能 SDN 的异构蜂窝网架构中,无线接入网和有线核心网的基础设施都置于相应 SDN 控制器的管理下,接入网控制器和核心网控制器之间可以交互各种业务信令,同时向上一级的业务总体控制器提供各种相应功能。在智能中心的帮助决策下,各个控制器可以根据用户的实时业务请求按需分配相应的传输资源。同时,每一条请求和传递都记录在智能中心的数据库中,以协助下一次资源调度决策和智能 SDN 的

自主学习。

3.3.2 网络功能虚拟化

在未来 5G 的异构蜂窝网架构中,无线端存在多种接入点,如广播基站、宏蜂窝、微蜂窝或 AP;多种接入方式,如 CDMA、OFDMA 或 Wi-Fi,不同的接入点和接入方式提供不同的传输服务。核心网中,选取不一样的交换机、中间件和网关,可以实现不同的路由选择和功能策略,以满足相应的业务服务要求。

这样,接入网和核心网内的基础设施分别通过各自的 SDN 控制器向上层业务提供不同策略优先级的功能(比如上下行分离、能效优先策略、低时延转发、高容量传输),不同的上层业务可以通过业务总体控制器向接入网和核心网控制器提出相应传输要求,并获得相应服务,如图 4 所示。比如,面向大连接的 IoT 业务数据量很小,但是对时延要求很敏感,总体控制器在检测到业务请求类型后,可以通过接入网控制器选择宏蜂窝完成信令控制和业务数据传输,同时通过核心网控制器选择时延优先的路由策略,以满足 IoT 业务总体的 QoS 需求。

在图 4 中,无线接入网控制器把所辖域内的所有物理资源都虚拟成池化资源,其中包括频谱资源、能量资源、接入基础设施以及用户请求记录等,利用这些虚拟资源,接入网控制器向上提供无线端的业务功能,包括广覆盖、高速数据传递、能量收割和用户多接入等核心网控制器把所辖区域内的所有物理资源也虚拟成池化资源,其中包括链路带宽、计算能力以及网元基础设施,利用这些虚拟资源,核心网控制器向上提供核心网的业务功能,包括智能路由、内容缓存、安全防护和负载均衡等。

同样在图 4 中,业务总体控制器基于接入网和核心网控制器向上提供的业务功能,虚拟出各种网络资源,继续向上提供业务服务,其中包括物联网业务、智慧城市业务、VoLTE、网上高速视频和车联网业务等。上层的移动虚拟运营商(mobile virtual network operator, MVNO)可以根据自身需要订购相应的业务。

在具体的资源调度和功能实现上,各个控制器需要和智能决策中心进行交互。智能决策中心根据收集到的大规模网络信息以及可扩展的功能引擎,对控制器请求做出快速而准确的决策,通过向外的服务端口完成请求应答。

4 结束语

首次提出了智能 SDN 的概念和架构,解决了以往

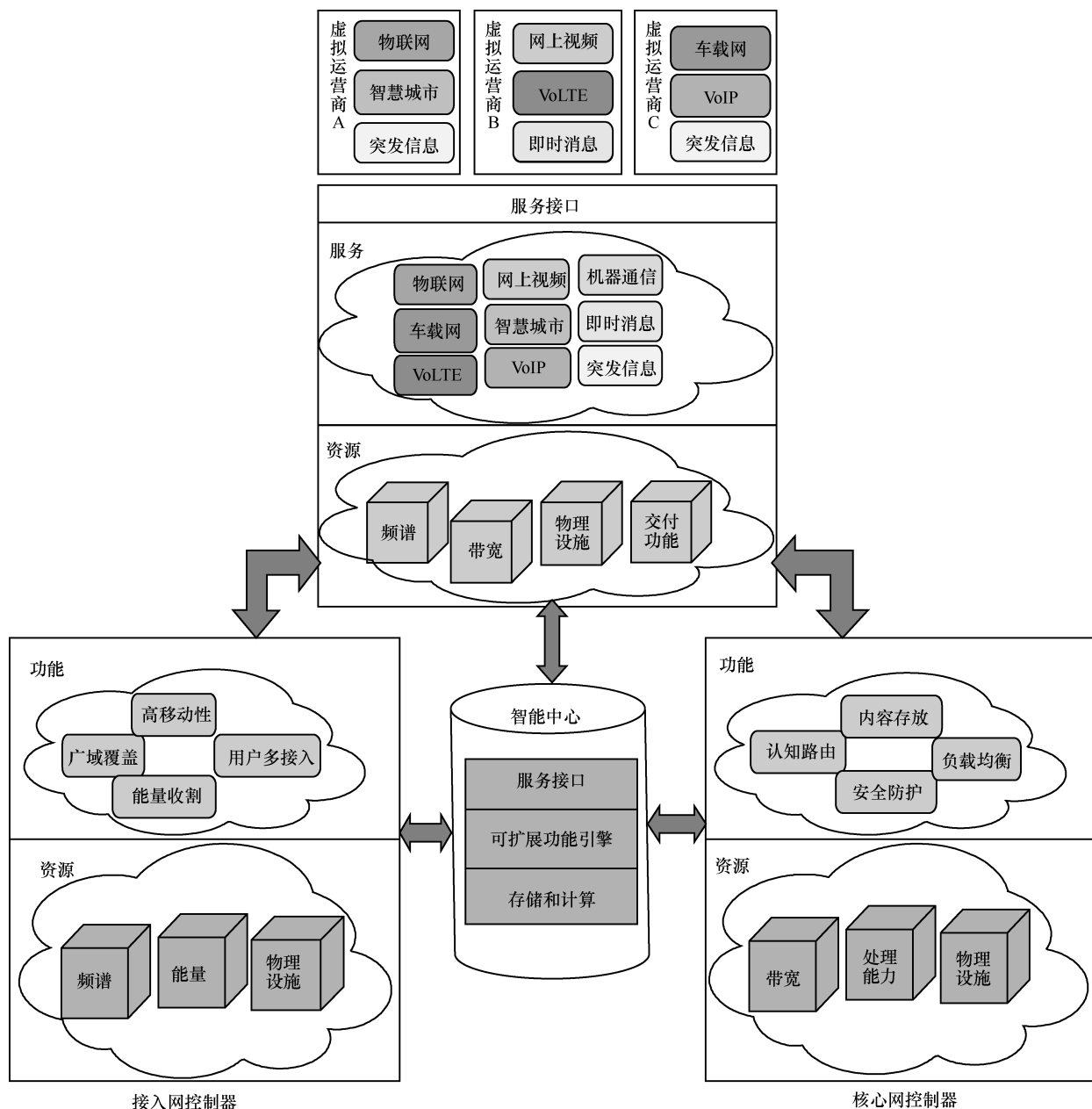


图 4 基于智能 SDN 异构蜂窝网的网络功能虚拟化

SDN 系统缺乏智能化的问题,同时通过对智能 SDN 所需的智能引擎、学习算法以及交互机制等关键技术的研究,形成完善的智能 SDN 技术体系。进一步地,通过与蜂窝网的结合,提出了基于智能 SDN 面向 5G 的异构蜂窝网络总体架构,实现了无线接入网和有线核心网与 SDN 的深度融合。通过智能 SDN 的控制和协调,使异构蜂窝网系统更加简洁,易于管理,便于扩展,并且在满足传统业务需求的同时能够根据需要快速部署新业务。在这一架构下,移动运营商可以提供规模化的、效果可感知的广泛业务,供上

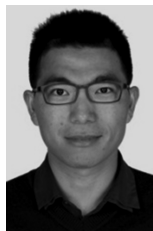
层的移动虚拟运营商使用,实现真正的以用户为中心、以业务为导向的移动通信产业。

参考文献:

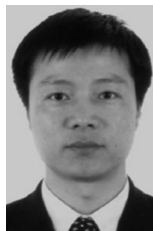
- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2015-2020 [R/OL]. (2016-02-04) [2016-03-18]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
- [2] GHOSH A. Heterogeneous cellular networks: from theory to practice [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6): 54-64.

- [3] ANDREWS J G. What will 5G be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [4] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2008, 38(2):69-74.
- [5] GUDIPATI A, PERRY D, LI L E, et al. SoftRAN: software defined radio access network [C]//ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, August 12-16, 2013, Hong Kong, China. New York: ACM Press, 2013: 25-30.
- [6] JIN X, LI L E, VANBEVER L, et al. Soft cell: scalable and flexible cellular core network architecture [C]//ACM Conference on Emerging Networking Experiments & Technologies, December 9-12, 2013, Santa Barbara, CA, USA. New York: ACM Press, 2013: 163-174.
- [7] BERNARDOS C. An architecture for software defined wireless networking [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 52-61.
- [8] YANG M, LI Y, JIN D, et al. OpenRAN: a software-defined RAN architecture via virtualization[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 549-550.
- [9] ZHOU S. Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(1): 12-19.
- [10] XU X Q. On functionality separation for green mobile networks: concept study over LTE [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 82-90.
- [11] SARABJOT S, ZHANG X C, ANDREWS J G. Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5360-5373.
- [12] KATERINA S, POPOVSKI P, GAVRILOVSKA L. Analysis of the decoupled access for downlink and uplink in wireless heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(2): 173-176.
- [13] RAO J B, FAPOJUWO A O. A survey of energy efficient resource management techniques for multicell cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 154-180.
- [14] LI R P, ZHAO Z F, ZHOU X, et al. The prediction analysis of cellular radio access network traffic: from entropy theory to networking practice [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(6): 234-240.
- [15] WICHTLHUBER M, REINECKE R, HAUSHEER D. An SDN-based CDN/ISP collaboration architecture for managing high-volume flows[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2015, 12(1): 48-60.
- [16] QIAO Y. Software-defined networking (SDN) and distributed denial of service (DDoS) attacks in cloud computing environments: a survey, some research issues, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(1): 602-622.
- [17] JÉRÔME F, FESTOR O. Anomaly traceback using software defined networking[C]//IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS), November 16-19, 2014, Rome, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2014: 203-208.

[作者简介]



周逸凡(1991-),男,浙江大学信息与电子工程学院博士生,主要研究方向为异构蜂窝网中的基站空间分布、智能 SDN 架构与下一代蜂窝网的融合技术。



赵志峰(1975-),男,浙江大学信息与电子工程学院副教授,主要研究方向为认知无线电、无线 mesh 网络和 SDN 在无线通信中的应用。



张宏纲(1967-),男,浙江大学信息与电子工程学院教授,主要研究方向为认知无线电、绿色通信和下一代异构蜂窝网络架构。