

DOI:10.3979/j.issn.1673-825X.2015.04.003



5G 移动通信网络关键技术综述

赵国锋, 陈 婧, 韩远兵, 徐 川

(重庆邮电大学未来网络研究中心 重庆 400065)

摘 要: 为适应未来海量移动数据的爆炸式增长, 加快新业务新应用的开发, 第五代移动通信(fifth generation mobile communication network, 5G) 网络应运而生。目前, 国内外已经逐渐明确了 5G 的愿景和需求, 如何将现有技术和多种潜在的新技术进行融合以实现 5G 网络成为下一步的研究与发展重点。面向未来 5G 的技术发展, 介绍 5G 的概念、应用场景以及终端用户对 5G 的相关需求; 然后, 重点阐述 5G 在无线网络方面具有发展前景的 10 大关键技术, 包括: 超密集异构网络、自组织网络、D2D(device-to-device) 通信、M2M(machine-to-machine) 通信、软件定义无线网络、信息中心网络、内容分发网络、移动云计算、软件定义网络/网络功能虚拟化、情景感知技术。给出了每种技术的基本概念或原理, 以及应用到 5G 网络时潜在的研究问题。最后概述了 5G 的发展趋势及存在的难点。

关键词: 5G; 无线网络; 关键技术; 发展趋势

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2015) 04-0441-12

Prospective network techniques for 5G mobile communication: A survey

ZHAO Guofeng, CHEN Jing, HAN Yuanbing, XU Chuan

(Future Networks Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

Abstract: In order to solve the explosive growth of mobile data traffic, massive terminals, new emerging businesses and varieties of novel services scenarios, the fifth generation mobile communication network (5G) is proposed and becoming a hot topic in academical and industrial field. Now, many countries or communities have completed the first step of 5G development which clarified the users' requirements and future vision of 5G. Therefore, when facing the 5G requirements into 2020, combine the existing and potential new technologies to implement the 5G network is now put on table. In this paper, we first introduce the concept of 5G, and some use cases and user-driven requirements. Then, we mainly focus on ten prospective key techniques of wireless networking, and they involve ultra-dense networking (UDN), self-organizing networking (SON), software-defined wireless networking (SDWN), content distribution network (CDN), information-centric networking (ICN), device-to-device (D2D) communication, machine-to-machine (M2M) communication, mobile cloud computing, software-defined networking/network function virtualization, and context-aware networking (CND). We present the fundamental concept or thought for each technique, and show the research topics when it is to be applied to 5G. Finally, we briefly discuss the future problems towards 5G.

Key words: 5G; wireless network; key techniques; development

收稿日期: 2015-06-28 修订日期: 2015-07-08 通讯作者: 赵国锋 zhaogf@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61402065); 江苏省未来网络创新研究院‘未来网络前瞻性研究’(BY2013095-2-03, BY2013095-5-07)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61402065); The ‘Future Network Prospective Research Project’ of Future Network Innovation Institute in Jiangsu Province (BY2013095-2-03, BY2013095-5-07)

0 引言

在过去40年的时间里,移动通信经历了飞跃式发展,给人们生活方式、工作模式以及政治、经济等方面带来了深刻影响,人们一直在追求更高性能的移动通信网络。2012年,欧盟正式启动METIS (mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society)项目^[1],进行5G移动通信网络的研究。除了METIS之外,欧盟启动了规模更大的科研项目5G-PPP,旨在加速欧盟5G研究和创新,确立欧盟在5G领域的主导地位;英国政府联合多家企业在Surrey大学成立5G研发中心,致力于5G的研究^[2-5]。在亚洲,韩国于2013年开启了“GIGA Korea”5G项目,中国IMT-2020推进组也于同年成立,团结亚洲地区的5G研究力量,共同推进5G技术标准的发展^[6]。可见,5G已成为国内外移动通信领域的研究热点。

1 5G概述

5G作为新一代无线移动通信网络,主要用于满足2020年以后的移动通信需求。在高速发展的移动互联网和不断增长的物联网业务需求共同推动下,要求5G具备低成本、低能耗、安全可靠的特点,同时传输速率提升10到100倍,峰值传输速率达到10 Gbit/s,端到端时延达到ms级,连接设备密度增加10到100倍,流量密度提升1 000倍,频谱效率提升5到10倍,能够在500 km/h的速度下保证用户体验^[7-9]。5G将使信息通信突破时空限制,给用户带来极佳的交互体验;极大缩短人与物之间的距离,并快速地实现人与万物的互通互联^[8]。

1.1 5G的应用场景

3G与4G主要聚焦于“移动宽带”这一应用场景,致力于给用户提供更系统的容量以及更快的无线接入速率。预计到2020年,各种物联网应用将得到广泛普及,智能电网、智慧城市、移动医疗、车载娱乐、运动健身,未来5G网络支持虚拟现实、超清视频以及移动游戏等应用服务,这类移动交互式应用对无线接入带宽和通信延迟有很高的需求^[9]。在公共安全方面,如:紧急语音通话、无人机远程监测、入侵监测、急救人员跟踪等场景,5G通信系统需要具有“零延迟”、高可靠性的特点。

1.2 用户终端对5G的需求

未来5G网络主要面向以终端用户为中心的通

信服务,注重提供更好的用户体验。面向2020年及以后,超高清视频、增强现实、云存储、在线游戏等业务均要求5G网络提供比现有网络更高的无线接入宽带和“无感知”的时延。未来5G网络必须具备在自然灾害、战争、病疫等发生之前能够实时提供准确的应急通信服务。在高速的移动实体,如:高铁、飞机等交通工具中,5G网络必须要具有非常好的移动性支持,为用户提供实时网络接入,邮件收发、娱乐等服务。“游牧式”的移动终端设备对移动性能要求不高,但在网络可靠性以及弹性方面有很高的要求。目前,对于能量利用效率与能耗的重视程度越来越高,网络功能的执行不应该过度地消耗能量,5G应能支持更低功耗,成为更加绿色环保的移动通信网络。

2 5G网络关键技术

目前5G网络关键技术仍处于研究阶段,究竟何种关键技术在未来能够适应5G的需求,仍是一个未知数。本文结合5G发展的基本需求、发展趋势,从无线网络方面重点综述10项富有发展前景的5G无线网络关键技术。

2.1 超密集异构网络

未来5G网络正朝着网络多元化、宽带化、综合化、智能化的方向发展。随着各种智能终端的普及,面向2020年及以后,移动数据流量将呈现爆炸式增长。在未来5G网络中,减小小区半径,增加低功率节点数量,是保证未来5G网络支持1 000倍流量增长的核心技术之一^[10-12]。因此,超密集异构网络成为未来5G网络提高数据流量的关键技术。

未来无线网络将部署超过现有站点10倍以上的各种无线节点,在宏站覆盖区内,站点间距离将保持10 m以内,并且支持在每1 km²范围内为25 000个用户提供服务^[13-15]。同时也可能出现活跃用户数和站点数的比例达到1:1的现象,即用户与服务节点一一对应^[16-17]。密集部署的网络拉近了终端与节点间的距离,使得网络的功率和频谱效率大幅度提高,同时也扩大了网络覆盖范围,扩展了系统容量,并且增强了业务在不同接入技术和各覆盖层次间的灵活性。虽然超密集异构网络架构在5G中有很大的发展前景,但是节点间距离的减少,越发密集的网络部署将使得网络拓扑更加复杂,从而容易出现与现有移动通信系统不兼容的问题。在5G移动通信网络中,干扰是一个必须解决的问题。网络中

的干扰主要有:同频干扰、共享频谱资源干扰、不同覆盖层次间的干扰等^[18-20]。现有通信系统的干扰协调算法只能解决单个干扰源问题,而在5G网络中,相邻节点的传输损耗一般差别不大,这将导致多个干扰源强度相近,进一步恶化网络性能,使得现有协调算法难以应对。此外,由于业务和用户对QoS需求的差异性很大,5G网络需要采用一些列措施来保障系统性能,主要有:不同业务在网络中的实现^[21-22]、各种节点间的协调方案、网络的选择^[23]、以及节能配置方法^[24]等。

准确有效地感知相邻节点^[25]是实现大规模节点协作的前提条件。在超密集网络中,密集地部署使得小区边界数量剧增,加之形状的不规则,导致频繁复杂的切换。为了满足移动性需求,势必出现新的切换算法^[26];另外,网络动态部署技术^[27-28]也是研究的重点。由于用户部署的大量节点的开启和关闭具有突发性和随机性,使得网络拓扑和干扰具有大范围动态变化特性;而各小站中较少的服务用户数也容易导致业务的空间和时间分布出现剧烈的动态变化。

2.2 自组织网络

传统移动通信网络中,主要依靠人工方式完成网络部署及运维,既耗费大量人力资源又增加运行成本,而且网络优化也不理想^[8]。在未来5G网络中,将面临网络的部署、运营及维护的挑战,这主要是由于网络存在各种无线接入技术,且网络节点覆盖能力各不相同,它们之间的关系错综复杂。因此,自组织网络(self-organizing network, SON)的智能化将成为5G网络必不可少的一项关键技术^[29-34]。

自组织网络技术解决的关键问题主要有以下2点:①网络部署阶段的自规划和自配置;②网络维护阶段的自优化和自愈合^[31]。自配置即新增网络节点的配置可实现即插即用,具有低成本、安装简易等优点。自优化的目的是减少业务工作量,达到提升网络质量及性能的效果^[32],其方法是通过UE和eNB测量,在本地eNB或网络管理方面进行参数自优化。自愈合指系统能自动检测问题、定位问题和排除故障,大大减少维护成本并避免对网络质量和用户体验的影响。自规划的目的是动态进行网络规划并执行,同时满足系统的容量扩展、业务监测或优化结果等方面的需求。目前,主要有集中式、分布式以及混合式3种自组织网络架构。其中,基于网管系统实现的集中式架构具有控制范围广、冲突小等

优点,但也存在着运行速度慢、算法复杂度高等方面的不足;而分布式恰恰相反,主要通过SON分布在eNB上来实现,效率和响应速度高,网络扩展性较好,对系统依赖性小,缺点是协调困难;混合式结合集中式和分布式2种架构的优点,缺点是设计复杂。SON技术应用于移动通信网络时,其优势体现在网络效率和维护方面,同时减少了运营商的资本性支出和运营成本投入。由于现有的SON技术都是从各自网络的角度出发,自部署、自配置、自优化和自愈合等操作具有独立性和封闭性,在多网络之间缺乏协作。因此,研究支持异构网络协作的SON技术具有深远意义。

2.3 内容分发网络

在未来5G中,面向大规模用户的音频、视频、图像等业务急剧增长,网络流量的爆炸式增长会极大地影响用户访问互联网的服务质量^[31]。如何有效地分发大流量的业务内容,降低用户获取信息的时延,成为网络运营商和内容提供商面临的一大难题。仅仅依靠增加带宽并不能解决问题,它还受到传输中路由阻塞和延迟、网站服务器的处理能力等因素的影响,这些问题的出现与用户服务器之间的距离有密切关系。内容分发网络(content distribution network, CDN)会对未来5G网络的容量与用户访问具有重要的支撑作用^[35-37]。

内容分发网络是在传统网络中添加新的层次,即智能虚拟网络。CDN系统综合考虑各节点连接状态、负载情况以及用户距离等信息,通过将相关内容分发至靠近用户的CDN代理服务器上,实现用户就近获取所需的信息,使得网络拥塞状况得以缓解,降低响应时间,提高响应速度。CDN网络架构如图1所示^[36],在用户侧与源server之间构建多个CDN代理server,可以降低延迟、提高QoS(quality of service)。当用户对所需内容发送请求时,如果源服务器之前接收到相同内容的请求,则该请求被DNS重定向到离用户最近的CDN代理服务器上,由该代理服务器发送相应内容给用户。因此,源服务器只需要将内容发给各个代理服务器,便于用户从就近的带宽充足的代理服务器上获取内容,降低网络时延并提高用户体验。随着云计算、移动互联网及动态网络内容技术的推进,内容分发技术逐步趋向于专业化、定制化,在内容路由、管理、推送以及安全性方面都面临新的挑战^[37]。

在未来5G网络中,随着智能移动终端的不断

普及和快速发展的应用服务,用户对移动数据业务需求量将不断增长,对业务服务质量的要求也不断提升。CDN 技术的优势正是为用户快速地提供信息服务,同时有助于解决网络拥塞问题。因此,CDN 技术成为 5G 必备的关键技术之一。

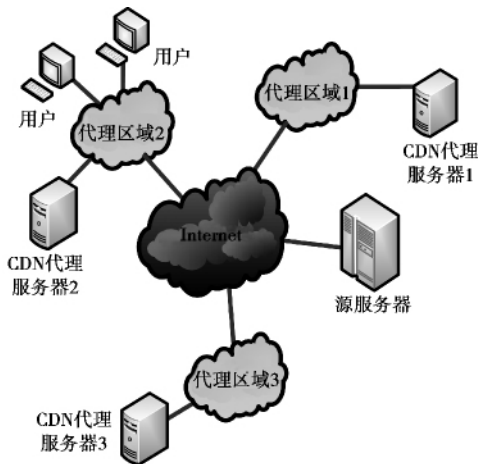


图 1 CDN 网络架构

Fig. 1 CDN network architecture

2.4 D2D 通信

在未来 5G 网络中,网络容量、频谱效率需要进一步提升,更丰富的通信模式以及更好的终端用户体验也是 5G 的演进方向。设备到设备通信(device-to-device communication, D2D)具有潜在的提升系统性能、增强用户体验、减轻基站压力、提高频谱利用率的前景^[38-43]。因此,D2D 是未来 5G 网络中的关键技术之一。

D2D 通信是一种基于蜂窝系统的近距离数据直接传输技术。D2D 会话的数据直接在终端之间进行传输,不需要通过基站转发,而相关的控制信令,如会话的建立、维持、无线资源分配以及计费、鉴权、识别、移动性管理等仍由蜂窝网络负责^[41]。蜂窝网络引入 D2D 通信,可以减轻基站负担,降低端到端的传输时延,提升频谱效率,降低终端发射功率^[43]。当无线通信基础设施损坏,或者在无线网络的覆盖盲区,终端可借助 D2D 实现端到端通信甚至接入蜂窝网络。在 5G 网络中,既可以在授权频段部署 D2D 通信,也可在非授权频段部署^[8]。

图 2 给出了 D2D 通信系统示意图。图中用户 1、用户 2 通过小区内 D2D 链路进行通信,用户 6、用户 7 通过小区间 D2D 链路进行数据交换,小区间和小区内 D2D 通信均受基站的控制。未来全球终端数量爆炸式增长,网络的接入负载是一个严峻的挑战,基于 D2D 的网络接入有助于解决诸如此类的问题。

大量低成本终端通过 D2D 方式接入邻近的特殊终端,通过特殊终端与蜂窝网络建立连接,这种方式能够提高频谱效率,缓解基站的接入压力。

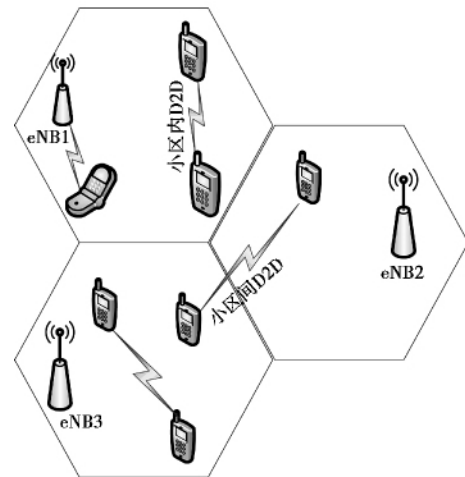


图 2 D2D 通信系统

Fig. 2 D2D communication system

5G 网络在引入 D2D 通信带来好处的同时,也面临一些挑战。当终端用户间的距离不足以维持近距离通信,或者 D2D 通信条件满足时,如何进行 D2D 通信模式和蜂窝通信模式的最优选择以及通信模式的切换都需要思考解决。小区内或者小区之间进行 D2D 通信会对其它用户和小区基站造成不可避免的干扰,干扰协调机制的研究成为 D2D 通信的一个研究方向。此外,D2D 通信中的资源分配优化算法也值得深入研究。

2.5 M2M 通信

M2M(machine to machine, M2M)作为物联网在现阶段最常见的应用形式,在智能电网、安全监测、城市信息化、环境监测等领域实现了商业化应用。3GPP 已经针对 M2M 网络制定了一些标准,并已立项开始研究 M2M 关键技术。根据美国咨询机构 FORRESTER 预测估计,到 2020 年,全球物与物之间的通信将是人与人之间通信的 30 倍^[44]。IDC 预测,在未来的 2020 年,500 亿台 M2M 设备将活跃在全球移动网络中。M2M 市场蕴藏着巨大的商机。因此,研究 M2M 技术对 5G 网络具有非同寻常的意义。

M2M 的定义主要有广义和狭义 2 种。广义的 M2M 主要是指机器对机器、人与机器间以及移动网络和机器之间的通信,它涵盖了所有实现人、机器、系统之间通信的技术;从狭义上说,M2M 仅仅指机器与机器之间的通信。智能化、交互式是 M2M 有别于其它应用的典型特征,这一特征下的机器也被

赋予了更多的“智慧”^[45]。M2M 海量终端的特点决定了其必须基于竞争的随机接入方式去获得信道资源,关于 M2M 随机接入的算法成果较少^[46],已有的随机接入协议包括完全随机多址接入协议 (ALOHA)、载波侦听多址接入协议 (CSMA)。另外,针对拥塞控制方面也有相关的研究^[47],而在 M2M 业务分析、网络建模和基于特定的网络模型下的系统性能分析方面,文献[48]提出了一个基于离散时间的会话级串联排队网络模型,分析了 M2M 通信业务对网络的影响;文献[49]基于排队论理论,分析了系统的网络时延、吞吐量以及丢包率等系统性能;文献[50]中,IBP + MMBP/Geo/1/K 分析模型的建立采用了休假排队网络理论,为 H2H 和 M2M 业务共存下的无线资源分配提供理论依据。

当前无线网络随着 M2M 终端、M2M 业务的不断涌入,正面临着前所未有的挑战。海量 M2M 终端接入时将引起无线网络过载和拥塞,不仅会影响移动用户的通信服务质量,还会造成用户难以接入网络等问题。因此,对自适应负荷控制机制的研究可以有效地解决 M2M 设备带来的无线网络拥塞问题。此外,在 M2M 通信中,充斥着大量小信息量数据包,这导致较低的网络传输效率,在无法充电的条件下,未来 5G 网络面临着延长 M2M 终端的续航时间的难题。

2.6 信息中心网络

随着实时音频、高清视频等服务的日益激增,基于位置通信的传统 TCP/IP 网络无法满足海量数据流量分发的要求。网络呈现出以信息为中心的发展趋势。信息中心网络 (information-centric network, ICN) 的思想最早是 1979 年由 Nelson 提出来的^[51],后来被 Baccala 强化^[52]。目前,美国的 CCN、DONA 和 NDN 等多个组织对 ICN 进行了深入研究。作为一种新型网络体系结构,ICN 的目标是取代现有的 IP。

ICN 所指的信息包括实时媒体流、网页服务、多媒体通信等,而信息中心网络就是这些片段信息的总集合。因此,ICN 的主要概念是信息的分发、查找和传递,不再是维护目标主机的可连通性。不同于传统的以主机地址为中心的 TCP/IP 网络体系结构,ICN 采用的是以信息为中心的网络通信模型,忽略 IP 地址的作用,甚至只是将其作为一种传输标识。全新的网络协议栈能够实现网络层解析信息名称、路由缓存信息数据、多播传递信息等功能,从而较好地解决计算机网络中存在的扩展性、实时性以

及动态性等问题。ICN 信息传递流程如图 3 所示,这是一种基于发布订阅方式的信息传递流程。首先,内容提供方发布自己所拥有的内容,网络中的节点就明白当收到相关内容的请求时如何响应该请求。然后,当第一个订阅方向网络发送内容请求时,节点将请求转发到内容发布方,内容发布方将相应内容发送给订阅方,带有缓存的节点会将经过的内容缓存。其他订阅方对相同内容发送请求时,邻近带缓存的节点直接将相应内容响应给订阅方。因此,信息中心网络的通信过程就是请求内容的匹配过程。传统 IP 网络中,采用的是“推”传输模式,即服务器在整个传输过程中占主导地位,忽略了用户的地位,从而导致用户端接收过多的垃圾信息。ICN 网络正好相反,采用“拉”模式,整个传输过程由用户的实时信息请求触发,网络则通过信息缓存的方式,实现快速响应用户。此外,信息安全只与信息自身相关,而与存储容器无关。针对信息的这种特性,ICN 网络采用有别于传统网络安全机制的基于信息的安全机制。这种机制更加合理可信,且能实现更细的安全策略粒度^[53]。和传统的 IP 网络相比,ICN 具有高效性、高安全性且支持客户端移动等优势。目前比较典型的 ICN 方案有 CCN、DONA、NetInf、INS 和 TRIAD。

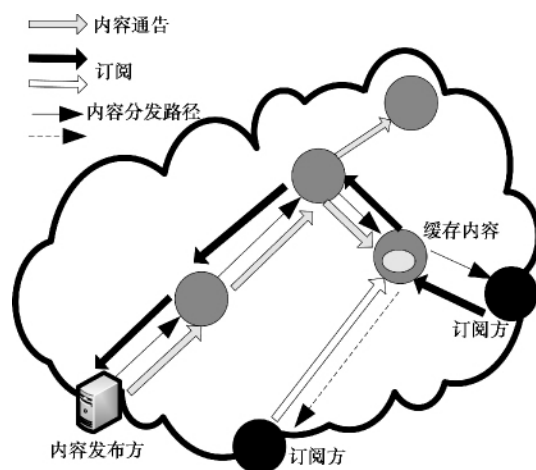


图3 信息中心网络

Fig. 3 Information-centric network

尽管 ICN 可以解决现有 IP 网络的固有问题,但在扩展性、数据移动性及大范围部署等方面存在不足,其中最为突出的是部署性问题。由于现有 IP 网络拥有广泛的覆盖范围,且成功地运营了几十年,ICN 的提出无疑是对 IP 网络的挑战。因此,未来 5G 网络应更加注重 ICN 与 IP 网络的结合,使得 ICN 的发展更加实用。

2.7 移动云计算

近年来,智能手机、平板电脑等移动设备的软硬件水平得到了极大地提高,支持大量的应用和服务,为用户带来了很大的方便^[54]。在 5G 时代,全球将会出现 500 亿连接的万物互联服务,人们对智能终端的计算能力以及服务质量的要求越来越高。移动云计算将成为 5G 网络创新服务的关键技术之一。

移动云计算是一种全新的 IT 资源或信息服务的交付与使用模式,它是在移动互联网中引入云计算的产物。移动网络中的移动智能终端以按需、易扩展的方式连接到远端的服务提供商,获得所需资源,主要包含基础设施、平台、计算存储能力和应用资源等^[55-60]。一种通用的移动云计算平台架构如图 4 所示。SaaS 软件服务为用户提供所需的软件应用,终端用户不需要将软件安装在本地的服务器中,只需要通过网络向原始的服务提供者请求自己所需要的功能软件。PaaS 平台的功能是为用户提供创建、测试和部署相关应用等服务。PaaS 自身不仅拥有很好的市场应用场景,而且能够推进 SaaS。而 IaaS 基础设施提供基础服务和应用平台。

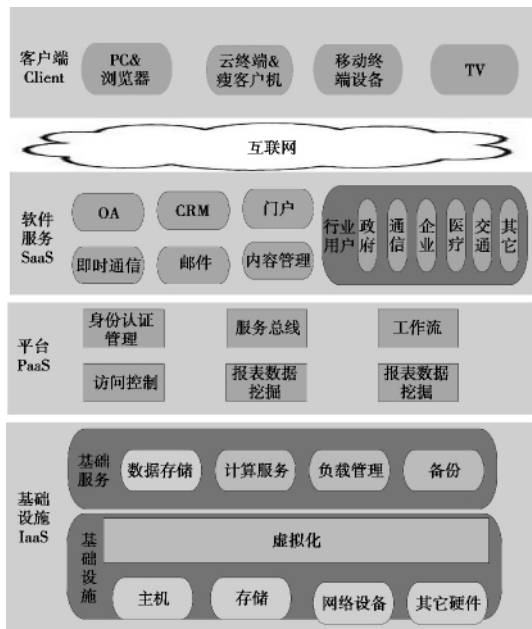


图 4 移动云计算平台架构

Fig. 4 Mobile cloud computing platform architecture

在移动云计算中,移动设备需要处理的复杂计算和数据存储从移动设备迁移到云中,降低了移动设备的能源消耗并弥补了本地资源不足的缺点。此外,由于云中的数据 and 应用程序存储和备份在一组分布式计算机上,降低了数据和应用发生丢失的概率。移动云计算还可以为移动用户提供远程的安全

服务,支持移动用户无缝地利用云服务而不会产生延迟、抖动。移动云是一个云服务平台,支持多种移动应用场景,例如:移动学习、移动医疗、智能交通等。尽管移动云计算能够大大增强移动终端的计算能力并降低终端能耗,但是由于移动智能终端与云计算中心的端到端网络传输时延与带宽具有不稳定性,移动云计算的通信通道传输时延无法保证。文献[60]结合无线接入网技术的特点,提出了一种分布式移动与计算协同架构,保证移动云计算的端到端服务质量。

未来 5G 网络中,多种异构网络将会并存,不同的移动设备将使用不同的无线接入技术来访问云。因此,满足异构网络间服务的无缝交互是移动云计算面临的一个重要挑战。

2.8 SDN/NFV

随着网络通信技术和计算机技术的发展,互联网+、三网融合、云计算服务等新兴产业对互联网在可扩展性、安全性、可控可管等方面提出了越来越高的要求。SDN (software-defined networking, 软件定义网络)/NFV (network function virtualization, 网络功能虚拟化)作为一种新型的网络架构与构建技术,其倡导的控制与数据分离、软件化、虚拟化思想,为突破现有网络的困境带来了希望^[61-70]。在欧盟公布的 5G 愿景中,明确提出将利用 SDN/NFV 作为基础技术支撑未来 5G 网络发展。

SDN 架构的核心特点是开放性、灵活性和可编程性。图 5 所示为 ONF 组织提出的 SDN 架构^[61]。主要分为 3 层:基础设施层位于网络最底层,包括大量基础网络设备,该层根据控制层下发的规则处理和转发数据;中间层为控制层,该层主要负责对数据转发面的资源进行编排,控制网络拓扑、收集全局状态信息等;最上层为应用层,该层包括大量的应用服务,通过开放的北向 API 对网络资源进行调用^[71]。SDN 将网络设备的控制平面从设备中分离出来,放到具有网络控制功能的控制器上进行集中控制。控制器掌握所有必需的信息,并通过开放的 API 被上层应用程序调用。这样可以消除大量手动配置的过程,简化管理员对全网的管理,提高业务部署的效率。SDN 不会让网络变得更快,但他会让整个基础设施简化,降低运营成本,提升效率。未来 5G 网络中需要将控制与转发分离,进一步优化网络的管理,以 SDN 驱动整个网络生态系统。

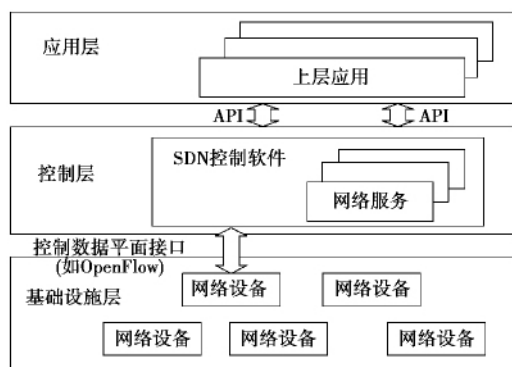


图5 SDN架构

Fig. 5 SDN architecture

NFV (network function virtualize, 网络功能虚拟化)是由欧洲电信标准组织(ETSI)^[67]从网络运营商的角度出发提出的一种新的网络架构。通过通用的IT技术与平台对网元进行功能虚拟化,针对不同的业务应用需求,在VNF的基础上进行相应的功能块连接与编排^[72-73]。ETSI定义的NFV框架如图6所示^[73]。

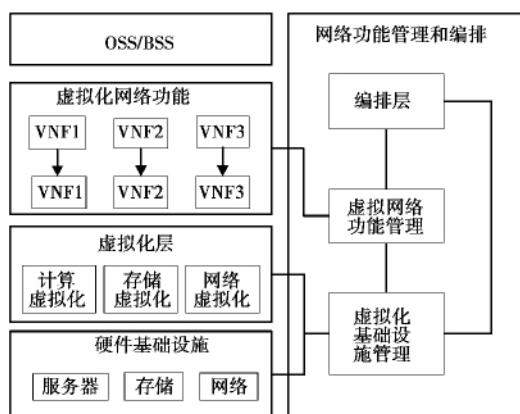


图6 NFV架构

Fig. 6 NFV architecture

NFV的核心思想是将网络逻辑功能与物理硬件解耦,利用软件编程实现虚拟化的网络功能,并将多种网元硬件归成标准化的通用三大类IT设备,即大容量服务器、存储器和数据交换机,实现软件的灵活加载,大幅降低基础设施硬件成本。网络资源的虚拟化可望构成统一的、云化的虚拟资源池以供统一调度使用。

从网络部署模式来看,SDN和NFV的结合将形成完整的解决方案,NFV技术实现各网元设备的虚拟化,而SDN则实现虚拟设备之间的数据交换与转发,业务编排。未来5G网络采用SDN/NFV技术,可以实现快速、简捷的新业务部署,并简化网络层次,降低网络的部署与运维成本^[73-76]。

2.9 软件定义无线网络

目前,无线网络面临着一系列的挑战。首先,无线网络中存在大量的异构网络,如:LTE、Wimax、UMTS、WLAN等,异构无线网络并存的现象将持续相当长的一段时间。目前,异构无线网络面临的主要挑战是难以互通,资源优化困难,无线资源浪费^[77],这主要是由于现有移动网络采用了垂直架构的设计模式。此外,网络中的一对多模型(即单一网络特性对多种服务),无法针对不同服务的特点提供定制的网络保障^[78],降低了网络服务质量和用户体验。因此,在无线网络中引入SDN思想将打破现有无线网络的封闭僵化现象,彻底改变无线网络的困境。

软件定义无线网络保留了SDN的核心思想,即将控制平面从分布式网络设备中解耦,实现逻辑上的网络集中控制,数据转发规则由集中控制器统一下发。软件定义无线网络的架构分为3个层面,如图7所示^[78]。在软件定义无线网络中,控制平面可以获取、更新、预测全网信息,例如:用户属性、动态网络需求以及实时网络状态。因此,控制平面能够很好地优化和调整资源分配、转发策略、流表管理等,简化了网络管理,加快了业务创新的步伐。此外,软件定义无线网络对网络功能进行抽象并提供开放的API,服务提供商利用这些开放的API能够为用户提供大量定制服务应用。同时,软件定义无线网络能指导终端用户接入更好的网络或由多个异构网络同时为用户提供服务。软件定义无线网络的控制与转发分离的思想,不仅简化了网络设备,还为设备提供了可编程性,使得异构网络之间的互通更加容易。目前,软件定义无线网络的研究处于初期阶段,大部分的工作聚焦于架构设计,如:OpenRoad^[79-80],Odin^[81],OpenRadio^[82],OpenRF^[83]等。

软件定义无线网络的提出给无线网络领域带来崭新的发展前景,但是软件定义无线网络架构中南北向接口尚未形成统一的标准。在未来5G网络中,传统网络将与软件定义无线网络长期共存,如何解决异构网络之间的兼容性问题,如何规范编程接口,如何发现灵活有效的控制策略都是软件定义无线网络面临的挑战。

2.10 情境感知技术

随着海量设备的增长,未来的5G网络不仅承载人与人之间的通信,而且还要承载人与物之间以及物与物之间的通信,既可支撑大量终端,又使个性

化、定制化的应用成为常态。情境感知技术能够让未来 5G 网络主动、智能、及时地向用户推送所需的信息。

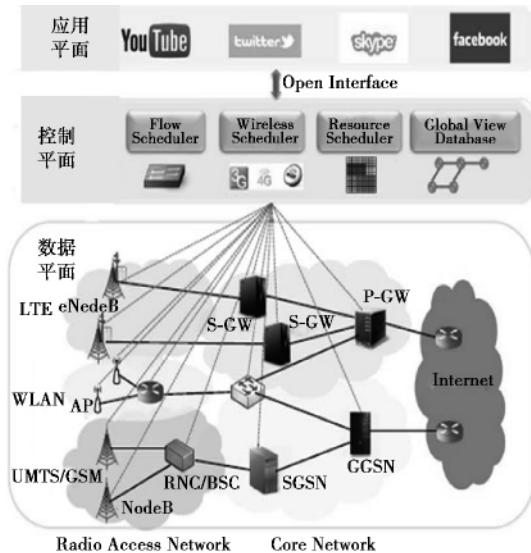


图 7 软件定义无线网络架构

Fig. 7 Software defined wireless networking architecture

情境感知 (context awareness) 技术源于所谓普适计算 (ubiquitous computing) 的研究,最早由 Schilit 于 1994 年提出^[84],它具有文献[85]所述特性,如:适应性、前瞻性、及时性、情景敏感性等,这是一种崭新的计算形式。情境感知技术是一个信息系统,采用传感器或无线通信等相关技术,使计算机设备、PDA、智能手机等设备具备感知当前情景的能力,并通过这些设备分析和确定可获得的情境信息,如用户当前位置、时间、附近的人和设备以及用户行为,主动为用户提供可靠的、合适的服务^[86]。情境感知技术使未来的移动互联网会主动、智能、及时地把最相关的信息推送给用户,而不是由用户主动向移动互联网发起信息请求,然后由用户在信息的“海洋”中苦苦地选择自己感兴趣的内容^[87-89]。

情境感知技术使得未来 5G 可以在网络约束以及运营商策略的框架之内智能地响应业务应用的相关需求,即“网络适应业务”^[9]。

3 结束语

5G 将是移动通信技术的一次革命性创新,它将满足人们对高质量生活的需求,实现无处不在的高速网络连接,是低能耗的、更安全的网络。本文综述了未来 5G 在无线网络方面潜在的十大关键技术,并对 5G 的发展背景、应用场景、需求等做了具体分析。

目前,世界各国针对未来 5G 移动通信网络在

技术的可行性研究、标准化以及产品发展方面进行了大量的投入,5G 的发展需要在统一的框架下进行全球范围内的协调。同时,在 5G 通信系统中,采用 6 GHz 频点以上无线频谱的可行性问题也成为了移动通信业界讨论的热门话题。对高频段的大带宽无线频谱资源的使用,不仅能够有效改善无线频谱效率,而且加快了无线数据传输速率和海量数据的处理能力。为了应对未来信息社会高速进步的趋势,网络应具备智能化的自感知和自调整能力,并且高度的灵活性也将成为未来 5G 网络必不可少的特性之一。同时,绿色节能也将成为 5G 发展的重要方向,网络的功能不再以能源的消耗为代价,实现无线移动通信的可持续发展。

参考文献:

- [1] METIS. Mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society [EB/OL]. [2015-04-30]. <https://www.metis2020.com>.
- [2] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five Disruptive Technology Directions for 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 74-80.
- [3] YUAN Yifei, ZHAO Xiaowu. 5G: Vision, Scenarios and Enabling Technologies [J]. ZTE Communications, 2015, 13(1): 69-79.
- [4] 周代卫,王正也,周宇.等. 5G 终端业务发展趋势及技术挑战 [J]. 电信网技术, 2015, (3): 64-68.
ZHAO Daiwei, WANG Zhengye, ZHOU Yu, et al. 5G Terminal Business Development Trend and Technical Challenge [J]. Telecommunications Network Technology, 2015, (3): 64-68.
- [5] 李路鹏,熊尚坤,王庆扬. 5G 技术展望 [C] // 2013 年度全国无线及移动通信学术大会. 中国山东青岛: 中国学术期刊电子杂志出版社, 2013: 14-16.
LI Lupeng, XIONG Shangkun, WANG Qingyang. 5G technology prospect [C] // 2013 Annual National Academic Conference of Wireless and mobile communications. Qingdao Shandong China: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2013: 14-16.
- [6] 任永刚,张亮. 第五代移动通信系统展望 [J]. 信息通信, 2014, (8): 255-256.
REN Yonggang, ZHANG Liang. Prospect of the fifth generation mobile communication system [J]. Information & communications, 2014, (8): 255-256.
- [7] 王志勤,罗振东,魏克军. 5G 业务需求分析及技术标准进程 [J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(2): 2-4, 25.
WANG Zhiqing, LUO Zhendong, WEI Kejun. 5G service requirements and progress on technical standards [J].

- ZTE Communications, 2014, 20(2): 2-4, 25.
- [8] IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G Vision and Requirements, white paper [EB/OL]. [2014-05-28]. <http://www.IMT-2020.cn>.
- [9] 4G AMERICAS. 4G Americas' Recommendations on 5G Requirements and Solutions, white paper [EB/OL]. [2014-10-23]. <http://www.4gamericas.org>.
- [10] RICHARD M. Anite Leads 5G Radio Channel Model Development [J]. Microwave Journal, 2013, 56(12): 43-44.
- [11] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [12] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
- YOU Xiaohu, PAN ZhiWen, GAO Xiqi, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques [J]. Science China Press, 2014, 44(5): 551-563.
- [13] HWANG I S, SONG B Y, SOLIMAN S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 20-27.
- [14] BALDEMAIR R, DAHLMAN E, PARKVALL S, et al. Future wireless communications [C]// Vehicular Technology Conference. Dresden: IEEE, 2013: 1-5.
- [15] LIU S, WU J J, CHUNG H K, et al. A 25 Gb/s/(km²) urban wireless network beyond IMT-advanced [J]. IEEE Commun Mag, 2011, 49(3): 122-129.
- [16] QUALCOMM RESEARCH. LTE Rel-12 & Beyond [S/OL]. [2015-05-11]. <http://www.qualcomm.com/1000x/>.
- [17] QUALCOMM RESEARCH. Neighborhood Small Cells for Hyper-Dense Deployments: Taking HetNets to the Next Level [J]. QualcommTechnologies, 2013, (3): 1-25.
- [18] GALIOTTO C, MARCHETTI N, DOYLE L. Flexible spectrum sharing and interference coordination for low power nodes in heterogeneous networks [C]// Vehicular Technology Conference. Quebec City: IEEE, 2012: 1-5.
- [19] JO Minho, MAKSYMUK T, BATISTA R L, et al. A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 21(6): 54-62.
- [20] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks [J]. IEEE J Sel Area Commun, 2012, 30(3): 550-560.
- [21] AMANI M, AIJAZ A, UDDIN N, et al. On mobile data offloading policies in heterogeneous wireless networks [C]// Vehicular Technology Conference. Dresden: IEEE, 2013: 1-5.
- [22] AIJAZ A, AGHVAMI H, AMANI M. A survey on mobile data offloading: Technical and business perspectives [J]. IEEE Wireless Commun, 2013, 20(2): 104-112.
- [23] TABRIZI H, FARHADI G, CIOFFI J. A learning based network selection method in heterogeneous wireless systems [C]// IEEE Global Telecommunications Conference. Houston TX USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [24] YOON S G, HAN J H, BAHK S W. Low-duty mode operation of femto base stations in a densely deployed network environment [C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Sydney NSW: IEEE, 2012: 636-641.
- [25] PRASAD A, LUNDEN P, TIRKKONEN O, et al. Mobility state based flexible inter-frequency small cell discovery for heterogeneous networks [C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications. London United Kingdom: IEEE, 2013: 2057-2061.
- [26] LOPEZ P D, GUVENC I, CHU X L. Mobility enhancements for heterogeneous networks through interference coordination [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Paris: IEEE, 2012: 69-74.
- [27] GOTSIS A G, STEFANATOS S, ALEXIOU A. Spatial coordination strategies in future ultra-dense wireless networks [C]// Wireless Communications Systems. Barcelona: IEEE, 2014: 801-807.
- [28] NI W, COLLINGS I B. A new adaptive small-cell architecture [J]. IEEE J Sel Area Commun, 2013, 31(5): 829-839.
- [29] ALIU O G, IMRAN A, IMARAN M A, et al. A survey of self-organization in future cellular networks [J]. IEEE Communications Society, 2013, 15(1): 336-361.
- [30] PREMNATH K N, RAJAVELU S. Challenges in self-organizing networks for wireless telecommunications [C]// Recent Trends in Information Technology (ICRTIT). Chennai Tamil Nadu: IEEE, 2011: 1331-1334.
- [31] 贺敬, 常疆. 自组织网络(SON)技术及标准化演进 [J]. 邮件设计技术, 2012, (12): 4-7.
- HE Jing, CHANG Jiang. SON Technology and Standardization Evolution [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2012, (12): 4-7.
- [32] 胡泊, 李文宇, 宋爱慧. 自组织网络技术及标准进展 [J]. 电信网技术, 2012, (12): 53-57.
- HU Po, LI Wenyu, SONG Aihui. SON Technologies and Its Standardization Development [J]. Telecommunications Network Technology, 2012, (12): 53-57.
- [33] 张广焯, 朱筱芳, 武亮紘. 自组织网络(SON)的应用

- 思考[J]. 邮电设计技术, 2012, (12): 23-25.
- ZHANG Guangzhuo, ZHU Xiaofang, WU Lianghong. Consideration the Application of SON [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2012, (12): 23-25.
- [34] 孙震强. SON 技术是降低网络成本和提高网络效率的利器[J]. 邮电设计技术, 2012, (12): 1-3.
- SUN Zhenqiang. SON is a Powerful Tool to Decrease Network Cost and Improvement Network Efficiency [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2012, (12): 1-3.
- [35] 张震, 张雷. 基于 CCN 的 CDN 视频内容分发技术研究[J]. 软件, 2015, (1): 67-71.
- ZHANG Zhen, ZHANG Lei. Research on CDN Video Content Delivery Technology in CCN [J]. Software, 2015, (1): 67-71.
- [36] 王玮. CDN 内容分发网络优化方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- WANG Wei. Research on the optimization of content delivery strategy in CDN [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [37] 李乔. 融合型内容分发网络关键技术研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Qiao. Research on key technology of merged content delivery network [D]. Hei Longjiang: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [38] YU C H, DOPPLER K, RIBERIRO C B, et al. Resource Sharing Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763.
- [39] WANG Bin, CHEN Li, CHEN Xiaohang, et al. Resource Allocation Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks [C]// Vehicular Technology Conference. Budapest: IEEE, 2011: 1-6.
- [40] NEIGN Golrezaei, Dimakis G. Femtocaching and Device-to-Device Collaboration: A New Architecture for Wireless Video Distribution [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(4): 142-149.
- [41] PENG Tao, LU Qianxi, WANG Haiming, et al. Interference Avoidance Mechanisms in the Hybrid Cellular and Device-to-Device Systems [C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo: IEEE, 2009: 617-621.
- [42] XU Wei, LIANG Le, ZHANG Hua, et al. Performance Enhanced Transmission in Device-to-Device Communications: Beam forming or interference cancellation? [C]// Global Communications Conference, Anaheim CA: IEEE, 2012: 4296-4301.
- [43] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114-119.
- WANG Junyi, GONG Zhishuai, FU Jieli, et al. A survey on device-to-device communication [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119.
- [44] SHAO Y L, TZU H L, KAO C Y, et al. Cooperative Access Class Barring for Machine-to-Machine Communications [J]. IEEE Wireless Communication, 2012, 11(1): 27-32.
- [45] NEC. NEC M2M: 让机器不再冰冷[J]. 通信世界, 2006(3): 20.
- NEC. NEC M2M: The machine is no longer cold [J]. Communications World Weekly, 2006(3): 20.
- [46] 王果. M2M 通信随机接入算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- WANG Guo. Algorithm Study on M2M Communication Random Access [D]. Peking: Tsinghua University, 2011.
- [47] SHAO Y L, KWANG C C. Massive Access Management for QoS Guarantee in 3GPP Machine-to-Machine Communications [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(3): 311-313.
- [48] 迟学芬, 赵莹莹. H2H、M2M 混合业务串联排队网络模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 1783-1787.
- CHI Xuefen, ZHAO Yingying. Tandem queuing network model of H2H and M2M mixed services [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1783-1787.
- [49] 张嘉盛, 李伏, 迟学芬, 等. M2M 业务批量到达排队系统性能分析[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2012, 30(4): 335-340.
- ZHANG Jiasheng, LI Fu, CHI Xuefen, et al. Performance Analysis of Batch Arrival Queuing System for M2M Service [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2012, 30(4): 335-340.
- [50] 迟学芬, 吴迪, 刘丹. 带有门限的 IBP + MMBP/Geo/1/K 休假排队系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(3): 781-787.
- CHI Xuefen, WU Di, LIU Dan. IBP + MMBP/Geo/1/K vacation queuing system with threshold [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(3): 781-787.
- [51] NELSON T. Literary machines: the report on, and of, project Xanadu concerning word processing, electronic publishing, hypertext, thinker toys, tomorrow's intellectual revolution, and certain other topics including knowledge, education and freedom [M]. Sausalito, California: Mindful Press, 1981.
- [52] BACCALA B. Data-oriented networking, Internet draft [EB/OL]. (2002-11-20) [2015-05-11]. <http://tools.ietf.org/html/draft-baccala-data-networking-00>.
- [53] 夏春梅, 徐明伟. 信息中心网络研究综述[J]. 计算机

- 科学与探索, 2013, (6): 481-493.
- XIA Chunmei, XU Mingwei. Survey of Information Centric Networking [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2013, (6): 481-493.
- [54] 李宏佳, 陈鑫, 周旭. 面向5G的分布式移动与计算协同架构与管理机制[J]. 中兴通讯技术, 2015, (2): 1-9.
- LI Hongjia, CHEN Xin, ZHOU Xu. Cooperative Management Architecture and Mechanism of 5G-Oriented Distributed Mobile Cloud Computing [J]. ZTE Communications, 2015, (2): 1-9.
- [55] KITANOV S, JANEVSKI T. State of the Art: Mobile Cloud Computing [C]// Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 2014 Sixth International Conference on. Tetova: IEEE, 2014: 153-158.
- [56] KUMAR R, RAJALAKSHMI S. Mobile Cloud Computing: Standard Approach to Protecting and Securing of Mobile Cloud Ecosystems [C]// Computer Sciences and Application. Wuhan: IEEE, 2013: 663-669.
- [57] GUPTA Neha, AGARWAL Amit. Context aware Mobile Cloud Computing: Review [C]// Computing for Sustainable Global Development. India: IEEE, 2015: 1061-1065.
- [58] DEV D, BAISHNAB KL. A Review and Research Towards Mobile Cloud Computing [C]// Mobile Cloud Computing, Service, and Engineering. Oxford: IEEE, 2014: 252-256.
- [59] TULI A, HASTEER N, SHARMA M, et al. Exploring challenges in Mobile cloud computing: An overview [C]// Confluence 2013: The Next Generation Information Technology Summit (4th International Conference), Noida: IET, 2013: 496-501.
- [60] THAKUR P K, VERMA A. Review on Various Techniques of Energy Saving in Mobile Cloud Computing [C]// Advanced Computing & Communication Technologies. Haryana: IEEE, 2015: 530-533.
- [61] Open Networking Foundation. Software defined networking: The new norm for networks [EB/OL]. (2012-04-20) [2015-02-12]. <http://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>.
- [62] HATA H. A study of requirements for SDN switch platform [C]// Intelligent Signal Processing and Communications Systems. Naha: IEEE, 2013: 79-84.
- [63] JARSCHER M, ZINNER T, HOSSFELD T, et al. Interfaces, attributes, and use cases: A compass for SDN [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(6): 210-217.
- [64] KUKLINSKI S. Programmable management framework for evolved SDN [C]// Network Operation and Management Symposium. Krakow: IEEE, 2014: 1-8.
- [65] SANTOS M A S, NUNES B A A, OBRACZKA K, et al. Decentralizing SDN's control plane [C]// Local Computer Networks. Edmonton AB: IEEE, 2014: 402-405.
- [66] HU Zhiyuan, WANG Mingwen, YAN Xueqiang, et al. A comprehensive security architecture for SDN [C]// Intelligence in Next Generation Networks. Paris: IEEE, 2015: 30-37.
- [67] ETSI NFV ISG. Network functions virtualization, white paper [EB/OL]. (2012-10-20) [2015-02-14]. <http://www.etsi.org/technologies-cluster/technologies/nfv>.
- [68] OMNES N, BOUILLON M, FROMENTOUX G, et al. A programmable and virtualized network & IT infrastructure for the internet of things: How can NFV & SDN help for facing the upcoming challenges [C]// Intelligence in Next Generation Networks. Paris: IEEE, Feb 2015: 64-69.
- [69] BATTULA L R. Network Security Function Virtualization (NSFV) towards Cloud computing with NFV Over Openflow infrastructure: Challenges and novel approaches [C]// Advances in Computing, Communications and Informatics. New Delhi: IEEE, 2014: 1622-1628.
- [70] MATIAS J, GARAY J, TOLEDO N, et al. Toward an SDN enabled NFV architecture [J]. IEEE Communications Magazine, IEEE Communications Society, 2015, 53(4): 187-193.
- [71] BATALLE J, FERRER R J, ESCALONA E, et al. On the Implementation of NFV over an OpenFlow Infrastructure: Routing Function Virtualization [C]// Future Networks and Services. Trento: IEEE, 2013: 1-6.
- [72] 周文瑜, 周金芳, 黄科, 等. EPC引入SDN/NFV的关键问题分析[J]. 互联网天地, 2014, (12): 60-63.
- ZHOU Wenyu, ZHOU Jinfang, HUANG Ke, et al. Analysis of Key Techniques for Introduction SDN/NFV to EPC [J]. China Internet, 2014, (12): 60-63.
- [73] 汪军, 李明栋. SDN/NFV——机遇和挑战[J]. 电信网技术, 2014, (6): 30-33.
- WANG Jun, LI Mingdong. SDN/NFV, Opportunities and Challenges [J]. Telecommunications Network Technology, 2014, (6): 30-33.
- [74] 赵慧玲, 史凡. SDN/NFV的发展与挑战[J]. 电信科学, 2014, (8): 13-18.
- ZHAO Huiling, SHI Fan. Development and Challenge of SDN/NFV [J]. Telecommunications Science, 2014, (8): 13-18.
- [75] 薛淼, 符刚, 朱斌, 等. 基于SDN/NFV的核心网演进关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2014, (3): 16-22.
- XUE Miao, FU Gang, ZHU Bin, et al. Research on Key Technologies of Core Network Evolution Based on SDN/NFV [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, March 2014, (3): 16-22.

- [76] 宋海滨, 尤建洁. NFV 创造网络新价值 [J]. 电信网技术, 2014, (6): 10-13.
SONG Haibing, YOU Jianjie. NFV is Creating New Value for Network [J]. Telecommunications Network Technology, 2014, (6): 10-13.
- [77] FERRUS R, SALLENTO O, AGUSTI R. Interworking in heterogeneous wireless networks: comprehensive framework and future trends [J]. IEEE Wireless Communication, 2010, 17(2): 22-31.
- [78] YANG Mao, YONG Li, JIN Depeng, et al. Software-Defined and Virtualized Future Mobile and Wireless Networks: A Survey [J]. Mobile Networks and Applications, 2015, 20(1): 4-18.
- [79] YAP K K, KOBAYASHI M, SHERWOOD R, et al. Openroads: empowering research in mobile networks [J]. SI-GCOMM Computer Commun Eev, 2010, 40(1): 125-126.
- [80] YAP K K, SHERWOOD R, KOBAYASHI M, et al. Blueprint for introducing innovation into wireless mobile networks [C]//In: Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on virtualized infrastructure systems and architectures. New York: ACM SIGCOMM, 2010: 25-32.
- [81] SURESH L, SCHULZ Z J, MERZ R, et al. Towards programmable enterprise WLANS with Odin [C]//In: Proceedings of the 1st workshop on hot topics in software defined networks. New York: ACM SIGCOMM, 2012: 115-120.
- [82] BANSAL M, MEHLMAN J, KATTI S, et al. Openradio: a programmable wireless data plane [C]// In: Proceedings of the 1st workshop on Hot topics in software defined networks. New York: ACM SIGCOMM, 2012: 109-114.
- [83] KUMAR S, CIFUENTES D, GOLLAKOTA S, et al. Bringing cross-layer mimo to today's wireless lans [J]. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2013, 43(4): 387-398.
- [84] JAEGU S, SEOKSOO K, GILCHEOL P. Towards a mobile and context-aware technology based healthcare system [C]// Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies. Jeju: IEEE, 2007: 591-594.
- [85] 童恩栋, 沈强, 雷君, 等. 物联网情景感知技术研究 [J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 9-14, 20.
TONG Endong, SHEN Qiang, LEI Jun, et al. Study on Context-aware technologies for Internet of Things [J]. Computer Science, 2011, 38(4): 9-14, 20.
- [86] ANIND K. Understanding and using context [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2001(5): 1-34.
- [87] LEAH F, JOANNA M. Impact of Screen Size on Performance, Awareness, and User Satisfaction with Adaptive Graphical User Interfaces [C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM SIGCOMM, 2008: 1247-1256.
- [88] 胡文静, 王睿. 情景感知技术在构建下一代数字图书馆中的应用 [J]. 图书馆学研究, 2015, (8): 24-28.
HU Wenjing, WANG Rui. Context-aware technology in next generation digital library [J]. Research on Library Science, 2015, (8): 24-28.
- [89] 张烁, 段富. 基于智能移动平台的情景感知技术研究 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(8): 166-169.
ZHANG Shuo, DUAN Fu. On Context-Aware Technology based on intelligent mobile platform [J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(8): 166-169.

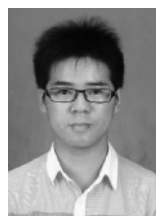
作者简介:



赵国锋(1972-), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为互联网技术、网络测试、网络测量。E-mail: zhaogf@cqupt.edu.cn。



陈靖(1990-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为未来网络。E-mail: 278770980@qq.com。



韩远兵(1990-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为未来网络。



徐川(1980-), 男, 重庆人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为未来网络、移动互联网、网络测量。

(编辑: 张 诚)