



专题:4G&5G

5G 蜂窝网络架构分析

杨峰义, 张建敏, 谢伟良, 王 敏, 王海宁

(中国电信股份有限公司技术创新中心 北京 100031)

摘 要:为了满足未来移动业务快速发展的需求,除了更宽的频谱带宽、更先进的无线接入技术外,5G 网络还需要新型的无线网络架构。根据 5G 网络主要性能要求,详细分析并总结了未来 5G 蜂窝网络架构的主要技术特征。基于上述讨论,提出了一种基于软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)技术的新型 5G 蜂窝网络架构,并针对 5G 蜂窝网络架构可能存在的问题与挑战进行讨论,为后续研究发展提供参考。

关键词:5G;网络架构;软件定义网络;网络功能虚拟化

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015117

Analysis of 5G Cellular Network Architecture

Yang Fengyi, Zhang Jianmin, Xie Weiliang, Wang Min, Wang Haining

(Technology Innovation Center of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: In order to satisfy the various requirements of future network services, 5G system should not only broaden the spectrum bandwidth and improve the spectrum efficiency through exploiting new technologies, but also need a novel wireless network architecture. Therefore, the key features of 5G cellular network architecture based on the demands of future network were analyzed and concluded. Meanwhile, a novel 5G architecture was proposed based on the software defined networking(SDN) and network function virtualization(NFV). In addition, the problems and challenges of the proposed 5G cellular network architecture were also discussed and analyzed.

Key words: 5G, network architecture, software defined networking, network function virtualization

1 引言

随着移动互联网和物联网的快速发展以及各种新型业务的不断涌现,移动通信在过去的 10 年间经历了爆炸式增长。丰富多彩的移动互联网和物联网业务在给人们生活带来便利、改变生活方式的同时,对未来移动通信网络提出了更高的要求和挑战。为了更好地应对未来移动数据流量的高速增长、海量的设备连接以及各种各样差异化新

型业务应用的涌现,全球范围内学术界和产业界已经展开对 5G 移动通信技术的深入研究。

欧盟最早于 2012 年 9 月在第七框架计划(FP7)下启动了面向 5G 研究的 5GNOW (5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signalling)课题,主要面向 5G 物理层技术进行研究^[1]。紧接着,11 月正式启动了名为 METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society)的 5G 研究项目,针

收稿日期:2014-08-22;修回日期:2015-05-06

基金项目:“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项“IMT-2020 网络架构研究”基金资助项目(No.2015ZX03002004)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2015ZX03002004)

论文引用格式: 杨峰义, 张建敏, 谢伟良等. 5G 蜂窝网络架构分析. 电信科学, 2015117

Yang F Y, Zhang J M, Xie W L, et al. Analysis of 5G cellular network architecture. Telecommunications Science, 2015117

对如何满足未来移动通信需求进行广泛研究^[2]。为了实现在2020年前开发5G技术,到2022年正式投入商业运营的目标,欧盟于2014年1月正式推出了5G PPP(5G Public-Private Partnership)项目。中国于2013年2月组织成立了IMT-2020(5G)推进组,旨在聚合中国产学研用力量来推动中国5G技术研究和开展国际交流与合作的主要平台^[3]。除此之外,韩国于2013年6月组织成立的5G技术论坛(5G Forum)、日本无线工业及商贸联合会(Association of Radio Industries and Businesses, ARIB)正式成立的5G研究组“2020 and Beyond Ad Hoc”以及其他国内外5G相关组织论坛都针对5G网络发展愿景、应用需求、关键技术指标以及使能技术等进行了广泛深刻的研究分析^[3-5]。

截至目前,未来5G网络的总体愿景以及性能要求已经基本达成共识,主要包括更高的数据流量和用户体验速率、海量终端连接以及更低时延等^[3-9]。预计到2020年,移动互联网和物联网各类新型业务和应用不断涌现,将带来1 000倍的数据流量增长以及超过500亿量级的终端设备连接^[6,7]。同时,虚拟现实等业务应用带来了严格的端到端时延要求。例如,当用操作杆在虚拟现实的环境中移动3D对象时,如果响应时延超过1 ms,会导致用户产生眩晕的感觉^[8]。相比于传统的无线系统端到端时延要求,5G网络毫秒级的时延要求提高了近两个数量级。因此,为了满足上述移动通信网络业务发展需求,相比于现有的LTE网络,未来5G网络需要实现以下目标^[5,9]:

- 数据流量密度提升1 000倍;
- 设备连接数目增加10~100倍;
- 用户体验速率改善10~100倍;
- MTC终端待机时长延长10倍;
- 端到端时延缩短5倍。

除此之外,为了推动移动通信业务的持续发展,一方面需要降低运营商网络的建设部署以及运营维护成本,主要包括网络设备、建设维护、新业务引入带来的复杂度和成本增加以及网络能耗增大导致的成本增加。因此,未来5G网络需要重点考虑低成本和高能效问题。另一方面,运营商需更进一步提升运营服务水平和竞争力,以适应不同虚拟运营商/用户/业务的差异化需求,并能够实现对用户行为和业务内容的智能感知和优化,即运营商服务能力和竞争力的提升对未来5G网络的网络能力开放性、可编程性、灵活性、可扩展性以及智能化提出了更高要求。

为了应对未来5G网络业务发展以及维护运营的需要,

需要从无线频谱、无线接入技术以及网络架构等多个层面综合考虑。其中,高频段甚至超高频段的深度开发利用、非授权频段的使用、离散频段的聚合以及低频段的重耕等为满足未来频谱资源的需求提供了可能的解决方案;大规模天线技术、毫米波技术、全双工技术、新型多址技术、终端直通(device-to-device, D2D)技术以及超密集组网(ultra dense network, UDN)技术等都对提升频谱利用率、增强5G网络性能带来了一定的贡献^[10-16]。除此之外,不仅未来5G网络需要具备的可编程性、灵活性以及可扩展性对网络架构提出了新的挑战,上述新型技术的引入同样需要未来网络架构做出相应改善,从而最大程度地挖掘新技术的性能增益。因此,为了满足未来5G网络的发展需求,网络架构的设计变得至关重要,也因此成为重点研究的内容。

2 5G 蜂窝网络架构技术特征

(1) 更高的数据流量和用户体验速率

未来移动网络数据流量增大1 000倍以及用户体验速率提升10~100倍的需求,给5G网络的无线接入网和核心网带来了极大的挑战。对于无线接入网,5G网络则需要从如何利用先进的无线传输技术、更多的无线频谱以及更密集的小区部署等技术进行设计规划^[16,17]。

首先,5G网络需要借助一系列先进的无线传输技术进一步提高无线频谱资源的利用率,主要包括大规模天线技术、高阶编码调制技术、新型多载波技术、新型多址接入技术、全双工技术等,从而提升系统容量。其次,5G网络需要通过高频段甚至超高频段(例如毫米波频段)的深度开发、非授权频段的使用、离散频段的聚合以及低频段的重耕等方案,满足未来网络对频谱资源的需求。

值得注意的是,除了增加频谱带宽和提高频谱利用率外,提升无线系统容量最为有效的办法依然是通过加密小区部署提升空间复用度。据统计,1957-2000年,通过采用更宽的无线频谱资源使得无线系统容量提升了约25倍,而大带宽无线频谱细分成多载波同样带来了无线系统容量约5倍的性能增益,并且先进的调制编码技术也将无线系统性能提升了5倍。然而,通过减小小区半径、增加频谱资源空分复用的方式,则将系统容量提升了约1 600倍^[18]。传统的无线通信系统通常采用小区分裂的方式减小小区半径,然而随着小区覆盖范围的进一步缩小,小区分裂将很难进行,需要在室内外热点区域密集部署低功率小基



站,形成UDN。在UDN的环境下,整个系统容量将随着小区密度的增加近乎线性增长^[9]。

可以看出,超密集组网是解决未来5G网络数据流量爆炸式增长问题的有效解决方案。据预测,在未来无线网络和宏基站覆盖的区域中,各种无线接入技术(radio access technology,RAT)的小功率基站的部署密度将达到现有站点密度的10倍以上^[10],形成超密集的异构网络,如图1所示。

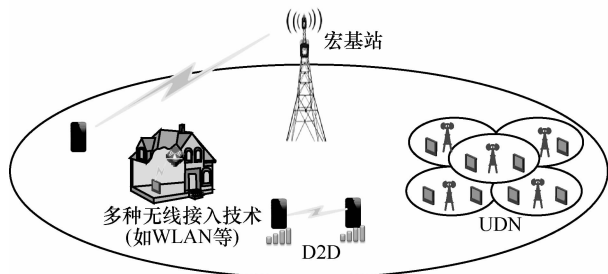


图1 超密集异构组网示意

然而,超密集组网通过降低基站与终端用户间的路径损耗提升了网络吞吐量,在增大有效接收信号的同时也放大了干扰信号,即超密集组网降低了热噪声对无线网络系统容量的影响,使其成为一个干扰受限系统。如何有效进行干扰消除、干扰协调成为超密集组网提升链路容量需要重点考虑的问题。更进一步,小区密度的急剧增加也使得干扰变得异常复杂。此时,5G网络除了需要在接收端采用更先进的干扰消除技术外,还需要具备更加有效的小区间干扰协调机制。考虑到现有LTE网络采用的分布式干扰协调(inter-cell interference coordination,ICIC)技术,其小区间交互控制信令负荷会随着小区密度的增加以二次方趋势增长,极大地增加了网络控制信令负荷。因此,在未来5G超密集网络的环境下,通过局部区域内的分簇化集中控制,解决小区间干扰协调问题,成为未来5G蜂窝网络架构的一个重要技术特征。

可以看出,基于分簇化的集中控制,不仅能够解决未

来5G网络超密集部署的干扰问题,而且能够更加容易地实现相同RAT下不同小区间的资源联合优化配置、负载均衡等以及不同RAT系统间的数据分流、负载均衡等,从而提升系统整体容量和资源整体利用率。

低功率基站较小的覆盖范围会导致具有较高移动速度的终端用户遭受频繁切换,从而降低用户体验速率。为了能够同时考虑“覆盖”和“容量”这两个无线网络重点关注的问题,未来5G接入网络可以通过控制面与数据面的分离,即分别采用不同的小区进行控制面和数据面操作,从而实现未来网络对于覆盖和容量的单独优化设计^[20]。此时,未来5G接入网可以灵活地根据数据流量的需求在热点区域扩容数据面传输资源,例如小区加密、频带扩容、增加不同RAT系统分流等,并不需要同时进行控制面增强。因此,无线接入网控制面与数据面的分离将是未来5G网络的另一个主要技术特征。以超密集异构网络为例,通过控制面与数据面分离,宏基站主要负责提供覆盖(控制面和数据面),小小区低功率基站则专门负责提升局部地区系统容量(数据面)。不难想象,通过控制面与数据面分离实现覆盖和容量的单独优化设计,终端用户需要具备双连接甚至多连接的能力。

除此之外,D2D技术作为除小区密集部署之外另一种缩短发送端和接收端距离的有效方法,既实现了接入网的数据流量分流,同时也可有效提升用户体验速率和网络整体的频谱利用率。在D2D场景下,不同收发终端用户对间以及不同收发用户对与小区收发用户间的干扰,同样需要无线接入网具备局部范围内的分簇化集中控制,实现无线资源的协调管理,从而降低相互间干扰,提升网络整体性能。

未来5G网络数据流量密度和用户体验速率的急剧增长,使得核心网同样经受着巨大的数据流量冲击。因此未来5G网络需要在无线接入网增强的基础上,对核心网的架构进行重新思考。

图2给出了传统的LTE网络架构。其中服务网关

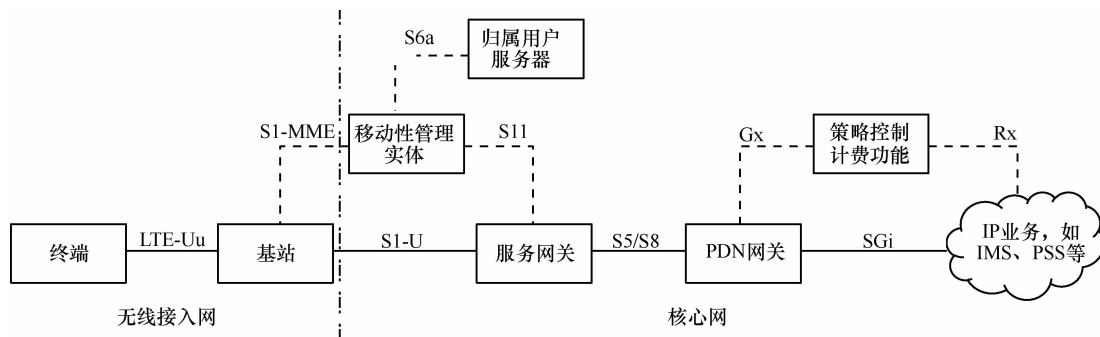


图2 传统LTE网络架构

(SGW)和PDN网关(PGW)主要负责处理用户面数据转发。同时,PGW还负责内容过滤、数据监控与计费、接入控制以及合法监听等网络功能。数据从终端用户到达PGW并不是通过直接的三层路由方式,而是通过GTP(GPRS tunneling protocol,GPRS隧道协议)隧道的方式逐段从基站送到PGW。LTE网络移动性管理功能由网元MME负责,但是SGW和PGW依然保留了GTP隧道的建立、删除、更新等控制功能。

可以看出,传统LTE核心网控制面与数据面的分割不是很彻底,且数据面功能过于集中,存在如下局限性^[21]。

- 数据面功能过度集中在LTE网络与互联网边界的PGW上,要求所有数据流必须经过PGW,即使是同一小区用户间的数据流也必须经过PGW,给网络内部新内容应用服务的部署带来困难;同时也对PGW的性能提出了更高的要求,且易导致PGW成为网络吞吐量的瓶颈。
- 网关设备控制面与数据面耦合度高,导致控制面与数据面需要同步扩容,由于数据面的扩容需求频度通常高于控制面,二者同步扩容在一定程度上缩短了设备的更新周期,同时带来设备总体成本的增加。
- 用户数据从PGW到eNode B的传输仅能根据上层传递的QoS参数转发,难以识别用户的业务特征,导致很难对数据流进行更加灵活精细的路由控制。
- 控制面功能过度集中在SGW、PGW,尤其是PGW上,包括监控、接入控制、QoS控制等,导致PGW设备变得异常复杂,可扩展性差。
- 网络设备基本是各设备商基于专用设备开发定制而成的,运营商很难将由不同设备商定制的网络设备进行功能合并,导致灵活性变差。

因此,为了更好地适应网络数据流量的激增,未来5G核心网需要将数据面下沉,通过本地分流的方式有效避免数据传输瓶颈的出现,同时提升数据转发效率。其次,通过核心网网关控制面与数据面的分离,使得网络能够根据业务发展需求实现控制面与数据面的单独扩容、升级优化,从而加快网络升级更新和新业务上线速度,可有效降低网络升级和新业务部署成本。除此之外,通过控制面集中化使得5G网络能够根据网络状态和业务特征等信息,实现灵活细致的数据流路由控制。更进一步,基于通用硬件平台实现软件与硬件解耦,可有效提升5G核心网的

灵活性和可扩展性,从而避免基于专用设备带来的问题,且更易于实现控制面与数据面分离以及控制面集中化。

不同于上述通过提升5G核心网数据处理能力应对数据流量激增的方法,缓存技术可以根据用户需求和业务特征等信息,有效降低网络传输所需数据流量^[22]。据统计,缓存技术在3G网络和LTE网络的应用可以降低1/3~2/3的移动数据量^[23,24]。为了更好地发挥缓存技术可能带来的性能提升,未来5G网络需要基于网络大数据实现智能化的分析处理。

(2)更低时延

为了应对未来基于机器到机器(M2M)的物联网新型业务在工业控制、智能交通、环境监测等领域应用带来的毫秒级时延要求,5G网络需要从空口、硬件、协议栈、骨干传输、回传链路以及网络架构等多个角度联合考虑。据估算,以未来5G无线网络满足1ms的时延要求为目标,物理层的时间最多只有100 μ s^[8],此时LTE网络1ms的传输时间间隔以及67 μ s的OFDM符号长度已经无法满足要求。广义频分复用(generalized frequency division multiplexing,GFDM)技术作为一种潜在的物理层技术,成为有效解决5G网络毫秒级时延要求的技术。

通过内容缓存以及D2D技术,同样可以有效降低数据业务端到端时延。以内容缓存为例,通过将受欢迎的内容(热门视频等)缓存在核心网,可以有效避免重复内容的传输,更重要的是降低了用户访问内容的时延,很大程度地提升了用户体验。除此之外,通过合理有效的受欢迎内容排序算法和缓存机制,将相关内容缓存在基站或者通过D2D方式直接获取所需内容,可以更进一步地提高缓存命中率、提升缓存性能。

基站的存储空间限制以及在UDN场景下每个小区服务用户数目较少,使得缓存命中率降低,从而无法降低传输时延。因此,未来5G网络除了要支持核心网缓存外,还需要支持基站间合作缓存机制,并通过分簇化集中控制的方式判断内容的受欢迎度以及内容存储策略。类似地,不同RAT系统间的内容缓存策略,同样需要5G网络能够进行统一的资源协调管理。

另外,更高的网络传输速率、本地分流、路由选择优化以及协议栈优化等都对降低网络端到端时延有一定程度的帮助。

(3)海量终端连接

为了应对到2020年终端连接数目10~100倍迅猛增长的需求,一方面可以通过无线接入技术、频谱、小区加密



等方式提升 5G 网络容量,满足海量终端连接需求,其中超密集组网使得每个小区的服务终端数目降低,缓解了基站负荷;另一方面,用户簇化管理以及中继等技术可以将多个终端设备的控制信令以及数据进行汇聚传输,降低网络的信令和流量负荷。同时,对于具有小数据突发传输的 MTC 终端,可以通过接入层和非接入层协议的优化合并以及基于竞争的非连接接入方式等,降低网络的信令负荷。

值得注意的是,海量终端连接除了带来网络信令和数据量的负荷外,最棘手的是其意味着网络中将同时存在各种各样需求迥异、业务特征差异巨大的业务应用,即未来 5G 网络需要能够同时支持各种各样的差异化业务。以满足某类具有低时延、低功耗的 MTC 终端需求为例,协议栈简化处理是一种潜在的技术方案。然而,同一小区内如何同时支持简化版本与非简化版本的协议栈则成为 5G 网络需要面临的棘手问题。因此,未来 5G 网络首先需要具备网络能力开放性、可编程性,即可以根据业务、网络等要求实现协议栈的差异化定制;其次,5G 网络需要能够支持网络虚拟化,使得网络在提供差异化服务的同时保证不同业务相互间的隔离度要求。

(4)更低成本

未来 5G 网络超密集的小区部署以及种类繁多的移动互联网和物联网业务的推广运营,将极大程度地增加运营商建设部署、运营维护成本。根据 Yankee Group 统计,网络成本占据整个运营商成本的 30%^[25]。

首先,为了降低超密集组网带来的网络建设、运营和维护复杂度以及成本的增加,一种可能的办法是通过减少基站的功能来降低基站设备的成本。例如,基站可以仅完成层一和层二的处理功能,其余高层功能则利用云计算技术实现多个小区的集中处理^[26]。对于这类轻量级基站,除了功能减少带来的成本降低外,第三方或个人用户部署的方式也会更进一步降低运营商的部署成本。同时轻量化基站的远程控制、自优化管理等同样可以降低网络的运营维护成本。

其次,传统的网络设备由各设备商基于专用设备开发定制而成,新的网络功能以及业务引入通常意味着新的专用网络设备的研发部署。新的专用网络设备将带来更多的能耗、设备投资以及针对新的设备而需要的技术储备、设备整合以及运营管理成本的增加。更进一步,网络技术以及业务的持续创新使得基于专用硬件的网络设备生命周期急剧缩短,降低了新业务推广可能带来的利润增长。因此,对于运营商,为了能够降低网络部署和业务推广运营

成本,未来 5G 网络有必要基于通用硬件平台实现软件与硬件解耦,从而通过软件更新升级方式延长设备的生命周期,降低设备总体成本。另外,通过软硬件解耦加速了新业务部署,为新业务快速推广赢得市场提供有力保证,从而带来运营商利润的增加。

考虑到传统的电信运营商为保持核心的市场竞争力、低成本以及高效率的运营状态,未来可能将重点集中于其最为擅长的核心网络的建设与维护,大量的增值业务和功能性业务则将转售给更加专业的企业,合作开展业务运营。同时由于用户对于业务的质量和服务的要求也越来越高,从而促使了国家移动通信转售业务运营试点资格(虚拟运营商牌照)的颁发。从商业的运作上看,虚拟运营商并不具有网络,而是通过网络的租赁使用为用户提供服务,将更多的精力投入新业务的开发、运营、推广、销售等领域,从而为用户提供更为专业的服务。为了能够降低虚拟运营商的投资成本,适应虚拟运营商的差异化要求,传统的电信运营商需要在同一个网络基础设施上为多个虚拟运营商提供差异化服务,同时保证各虚拟运营商间相互隔离、互不影响。

因此,未来 5G 网络首先需要具备网络能力开放性、可编程性,即可以根据虚拟运营商业务要求实现网络的差异化定制;其次,5G 网络需要支持网络虚拟化,使得网络在提供差异化服务的同时保证不同业务间的隔离度要求。

(5)更高能效

不同于传统的无线网络仅仅以系统覆盖和容量为主要目标进行设计,未来 5G 网络除满足覆盖和容量这两个基本需求外,还要进一步提高网络能效。5G 网络能效的提升一方面意味着网络能耗的降低,缩减了运营商的能耗成本,另一方面意味着延长终端的待电时长,尤其是 MTC 类终端的待电时长。

首先,无线链路能效的提升可以有效降低网络和终端的能耗。例如,超密集组网通过缩短基站与终端用户距离,极大程度地提升无线链路质量,可有效提升链路的能效。大规模天线通过无线信号处理的方法可以针对不同用户实现窄波束辐射,在增强无线链路质量的同时减少了能耗以及对应的干扰,从而有效提升了无线链路能效。

其次,在通过控制面与数据面分离实现覆盖与容量分离的场景下,由于低功率基站较小的覆盖范围以及终端的快速移动,使得小小区负载以及无线资源使用情况骤变。此时,低功率基站可在统一协调的机制下根据网络负荷情况

动态地实现打开或者关闭,在不影响用户体验的情况下降低了网络能耗。因此,未来 5G 网络需要通过分簇化集中控制的方式并基于网络大数据的智能化进行分析处理,实现小区动态关闭/打开以及终端合理的小区选择,提升网络能效。

对于无线终端,除通过上述办法提升能效、延长电池使用寿命外,采用低功耗高效能配件(如处理器、屏幕、音视频设备等)也可以有效延长终端电池寿命。更进一步,通过将高能耗应用程序或其他处理任务从终端迁移至基站或者数据处理中心等,利用基站或数据处理中心强大的数据处理能力以及高速的无线网络,实现终端应用程序的处理以及反馈,缩减终端的处理任务,延长终端电池寿命。

综上所述,为了满足未来 5G 网络性能要求,即数据流量密度提升 1 000 倍、设备连接数目提升 10~100 倍、用户体验速率提升 10~100 倍、MTC 终端待机时长延长 10 倍、时延降低 5 倍的业务需求以及未来网络更低成本、更高能效等持续发展的要求,需要从无线频谱、接入技术以及网络架构等多个角度综合考虑。图 3 给出了 5G 网络需求、关键技术以及 5G 蜂窝网络架构的主要特征。

可以看出,未来 5G 蜂窝网络架构的主要技术特征包括:接入网通过控制面与数据面分离实现覆盖与容量的分

离或者部分控制功能的抽取,通过分簇化集中控制实现无线资源的集中式协调管理;核心网则主要通过控制面与数据面分离以及控制面集中化的方式实现本地分流、灵活路由等功能。除此之外,通过软件与硬件解耦和上述四大技术特征的有机结合,使得未来 5G 网络具备网络能力开放性、可编程性、灵活性和可扩展性。

3 基于 SDN 和 NFV 的 5G 蜂窝网络架构

IT 新技术的发展给满足未来 5G 网络架构技术特征带来了希望。其中以控制面与数据面分离和控制面集中化为主要特征的 SDN 技术^[26]以及以软件与硬件解耦为特点的 NFV 技术的结合^[27],有效地满足未来 5G 网络架构的主要技术特征,使 5G 网络具备网络能力开放性、可编程性、灵活性和可扩展性。更进一步,基于云计算技术以及网络与用户感知体验的大数据分析,实现业务和网络的深度融合,使 5G 网络具备用户行为和业务感知能力,更加智能化^[28]。因此,本文提出了一种基于 SDN 和 NFV 技术的新型 5G 蜂窝网络架构,如图 4 所示。

可以看出,5G 蜂窝网络是集多种接入技术(3G/4G/5G、Wi-Fi 等)、多种部署场景(宏基站覆盖、微基站超密集

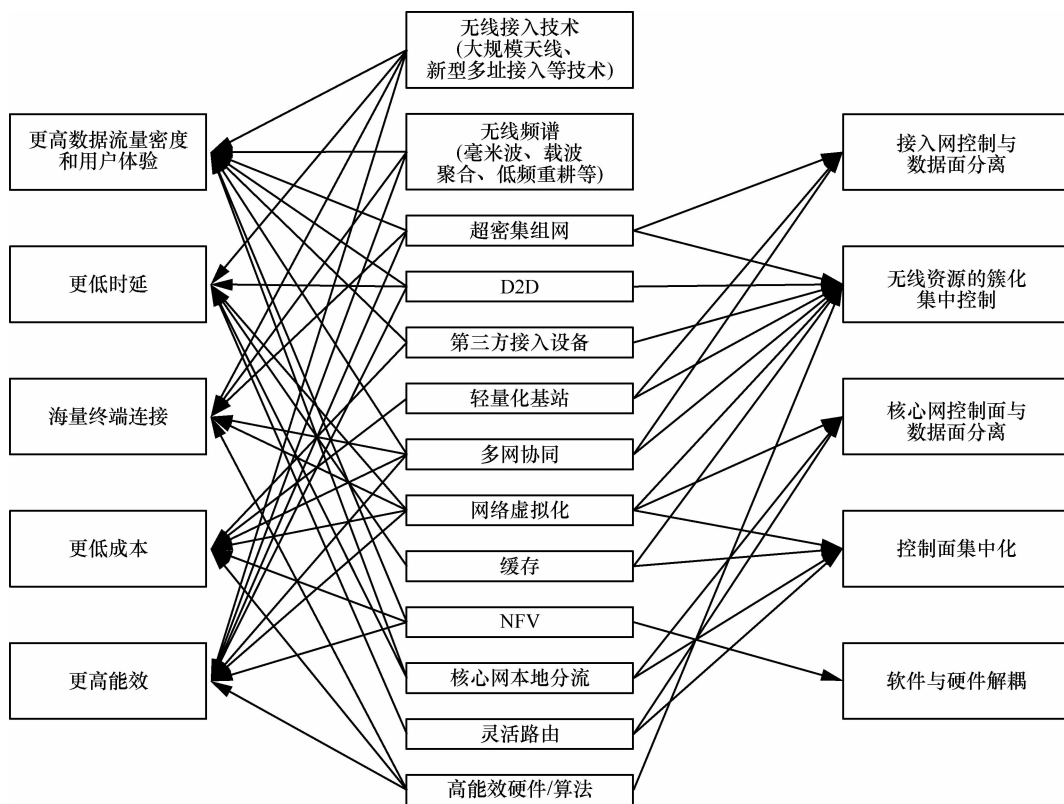


图 3 5G 网络关键技术与架构特征

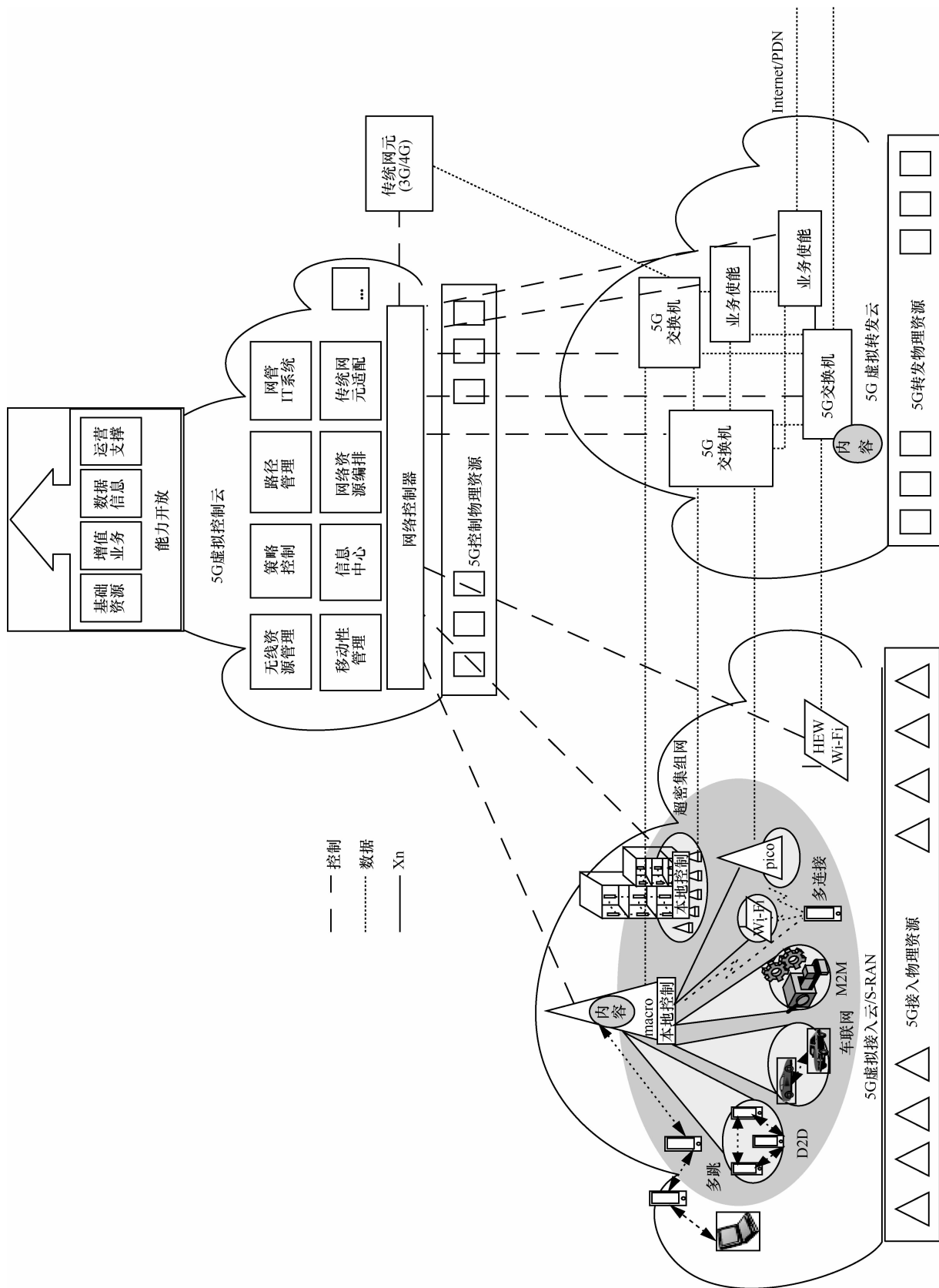


图4 基于SDN和NFV的5G蜂窝网络架构

组网、宏微联合覆盖)以及多种连接方式(D2D、多跳连接、mesh连接等),并根据业务应用(车联网、M2M等)灵活部署的融合网络。

接入方面借鉴控制面与数据面分离的思想,一方面通过覆盖与容量的分离,实现未来网络对于覆盖和容量的单独优化设计,实现根据业务需求灵活扩展控制面和数据面资源;另一方面通过将基站部分无线控制功能进行抽离和分簇化集中式控制,实现簇内小区间干扰协调、无线资源协同、跨制式网络协同等智能化管理,构建以用户为中心的虚拟小区。在此基础上,通过簇内集中控制、簇间分布式协同等机制,实现终端用户灵活接入,提供极致的用户体验。

核心网控制面与数据面的进一步分离和独立部署,使得网络能够根据业务发展需求实现控制面与数据面的单独扩容、升级优化以及按需部署,从而加快网络升级更新速度、新业务上线速度以及数据面下沉本地分流,保证了未来网络的灵活性和可扩展性。控制面集中化使得网络能够根据网络状态和业务特征等信息,实现灵活细致的数据流路由控制。同时,基于以实现软件与硬件解耦为特征的网络功能虚拟化技术,实现了通用网络物理资源的充分共享和按需编排资源,可进一步提升网络的可编程性、灵活性和可扩展性,提高网络资源的利用率。

除此之外,5G网络架构支持通过网络虚拟化和能力开放,实现网络对虚拟运营商/用户/业务等第三方的开放和共享,并根据业务要求实现网络的差异化定制和不同业务相互间的隔离,提升整体运营服务水平。

更进一步,基于云计算的5G网络架构,可大幅度提升网络数据处理能力、转发能力以及整个网络系统容量。同时,基于云计算的大数据处理,通过用户行为和业务特性的感知,实现业务和网络的深度融合,使5G网络更加智能化。下面将介绍5G蜂窝网络架构控制云、接入云以及转发云三大部分的主要功能。

3.1 控制云

控制云作为5G蜂窝网络的控制核心,由多个运行在云计算数据中心的网络控制功能模块组成,主要包括无线资源管理模块、移动性管理模块、策略控制模块、信息中心模块、路径管理模块、网络资源编排模块、传统网元适配模块、能力开放模块等,具体介绍如下。

- 无线资源管理模块:系统内无线资源集中管理、跨系统无线资源集中管理、虚拟化无线资源配置。
- 移动性管理模块:跟踪用户位置、切换、寻呼等移动

相关功能。

- 策略控制模块:接入网发现与选择策略、QoS策略、计费策略等。
- 信息中心模块:用户签约信息、会话信息、大数据分析信息等。
- 路径管理模块:根据用户信息、网络信息、业务信息等制定业务流路径选择与定义。
- 网络资源编排:按需编排配置各种网络资源。
- 传统网元适配:模拟传统网元,支持对现网3G/4G网元的适配。
- 能力开放模块:提供API对外开放基础资源、增值业务、数据信息、运营支撑四大类网络能力。

可以看出,相比于传统LTE网络,5G网络控制云将分散的网络控制功能进一步集中和重构、功能模块软件化、网元虚拟化,并对外提供统一的网络能力开放接口。同时,控制云通过API接收来自接入云和转发云上报的网络状态信息,完成接入云和转发云的集中优化控制。

3.2 接入云

5G网络接入云包含多种部署场景,主要包括宏基站覆盖、微基站超密集覆盖、宏微联合覆盖等,如图5所示。

可以看出,在宏—微覆盖场景下,通过覆盖与容量的分离(微基站负责容量,宏基站负责覆盖及微基站间资源协同管理),实现接入网根据业务发展需求以及分布特性灵活部署微基站。同时,由宏基站充当的微基站间的接入集中控制模块,对微基站间干扰协调、资源协同管理起到了一定帮助。然而对于微基站超密集覆盖的场景,微基站间的干扰协调、资源协同、缓存等需要进行分簇化集中控制。此时,接入集中控制模块可以由所分簇中某一微基站负责或者单独部署在数据处理中心。类似地,对于传统的宏覆盖场景,宏基站间的集中控制模块可以采用与微基站超密集覆盖同样的方式进行部署。

未来5G接入网基于分簇化集中控制的主要功能主要体现在集中式的资源协同管理、无线网络虚拟化以及以用户为中心的虚拟小区3个方面,如图6所示。

(1) 资源协同管理

基于接入集中控制模块,5G网络可以构建一种快速、灵活、高效的基站间协同机制,实现小区间资源调度与协同管理,提升移动网络资源利用率,进而大大提升用户的业务体验。总体来讲,接入集中控制可以从如下几个方面提升接入网性能。

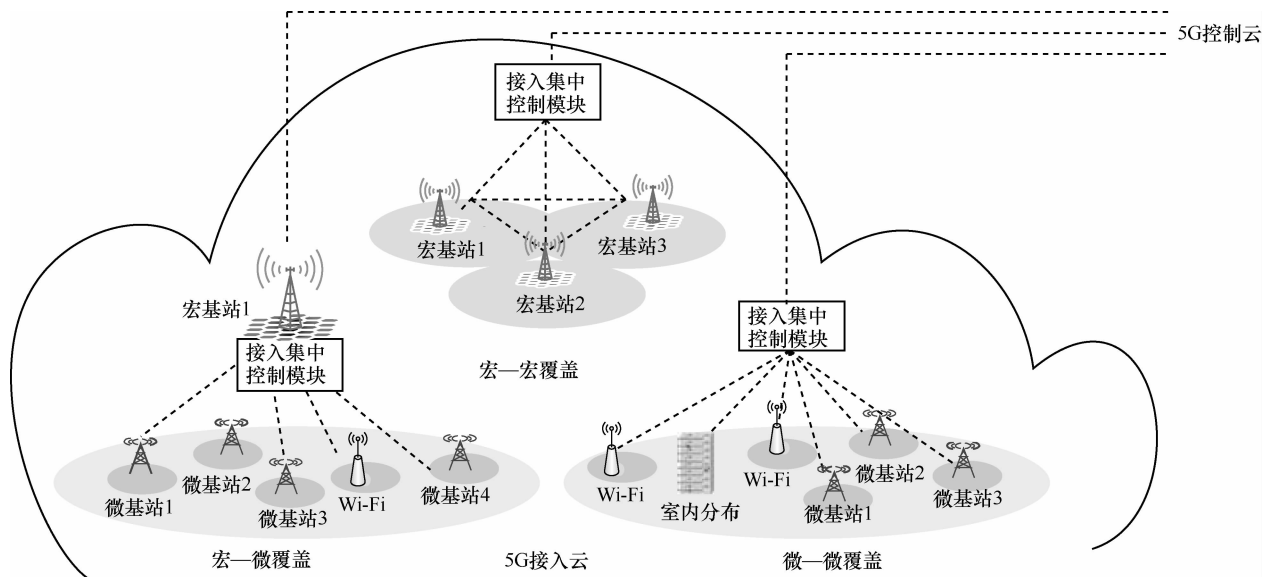


图5 无线接入网覆盖场景

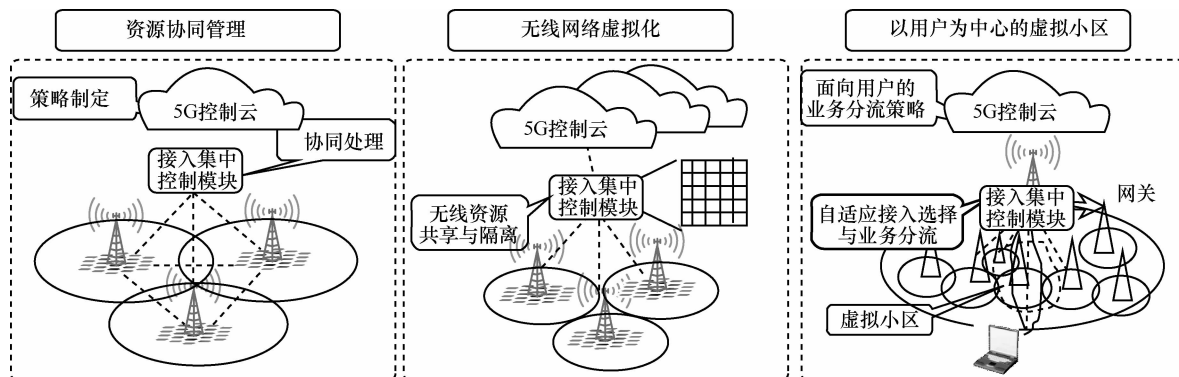


图6 接入网簇化集中控制的主要优势

- 干扰管理:通过多个小区间的集中协调处理,可以实现小区间干扰的避免、消除甚至利用。例如,通过多点协同(coordinated multipoint, CoMP)技术可以使得超密集组网下的干扰受限系统转化为近似无干扰系统^[15]。
- 网络能效:通过分簇化集中控制的方式,并基于网络大数据的智能化分析处理,实现小区动态关闭/打开以及终端合理的小区选择,在不影响用户体验的前提下,最大程度地提升网络能效。
- 多网协同:通过接入集中控制模块易于实现对不同RAT系统的控制,提升用户在跨系统切换时的体验,除此之外,基于网络负载以及用户业务信息,接入集中控制模块可以实现同系统间以及不同系统间的负载均衡,提升网络资源利用率。
- 基站缓存:接入集中控制模块可基于网络信息以及

用户访问行为等信息,实现同一系统下基站间以及不同系统下基站间的合作缓存机制的指定,提升缓存命中率、降低用户内容访问时延和网络数据流量。

(2) 无线网络虚拟化

如前文所述,为了满足不同虚拟运营商/业务/用户的差异化需求,5G网络需要采用网络虚拟化满足不同虚拟运营商/业务/用户的差异化定制。通过将网络底层时、频、码、空、功率等资源抽象成虚拟无线网络资源,进行虚拟无线网络资源切片管理,依据虚拟运营/业务/用户定制化需求,实现虚拟无线资源灵活分配与控制(隔离与共享),充分适应和满足未来移动通信后向经营模式对移动通信网络提出的网络能力开放性、可编程性需求。

(3) 以用户为中心的虚拟小区

针对多制式、多频段、多层次的密集移动通信网络,将无线接入网络的控制信令传输与业务承载功能解耦,依照

移动网络的整体覆盖与传输要求,分别构建虚拟无线控制信息传输服务和无线数据承载服务,进而降低不必要的频繁切换和信令开销,实现无线接入数据承载资源的汇聚整合。同时,依据业务、终端和用户类别,灵活选择接入节点和智能业务分流,构建以用户为中心的虚拟小区,提升用户一致性业务体验与感受。

3.3 转发云

5G网络转发云实现了核心网控制面与数据面的彻底分离,更专注于聚焦数据流的高速转发与处理。同时,运营商业务使能网元(防火墙、视频转码器等)在转发云中的部署,将传统网络的链状部署改善为与转发网元一同网状部署。此时,转发云根据控制云的集中控制,使5G网络能够根据用户业务需求,软件定义每个业务流转发路径,实现转发网元与业务使能网元的灵活选择。除此之外,转发云可以根据控制云下发的缓存策略实现受欢迎内容的缓存,降低核心网数据量。

为了提升转发云的数据处理和转发效率等,转发云需要周期或非周期地将网络状态信息通过API上报给控制云进行集中优化控制。考虑到控制云与转发云之间的传播时延,某些对时延要求特别严格的事件需要转发云进行本地处理。

4 挑战

综上所述,以控制面与数据面分离和控制面集中化为主要特征的SDN技术和以软件与硬件解耦为特点的NFV技术的结合,有效地满足了未来5G网络架构的主要技术特征需求,使5G网络具备网络能力开放性、可编程性、灵活性和可扩展性。同时,基于云计算的大数据处理,通过用户行为和业务特性的感知,实现业务和网络的深度融合,使5G网络更加智能化。本文提出了一种基于SDN和NFV技术的新型5G蜂窝网络架构,能够适应未来网络业务发展以及维护运营的需求。然而,上述蜂窝SDN架构真正应用到移动通信网络中还存在很多问题与挑战,主要包括以下几个方面。

(1) 无线接入集中控制模块与基站间功能划分

目前无线接入集中控制模块与基站间功能的划分成为影响系统性能以及可扩展性的关键因素。如何针对现有通用服务器的处理性能、控制器与基站间的传输时延等参数,给出具体的集中式控制模块与基站间功能划分成为上述架构在移动通信网络中应用首先面临的问题。

(2) 数据面转发性能

以核心网架构为例,基于OpenFlow的数据面交换机,

采用流表结构处理分组数据。网络中应用程序的增加极有可能导致交换机列表的急剧膨胀,从而导致交换机性能的下降。同时,随着OpenFlow版本的不断发布以及特性的增加,会导致流表项越来越长,在增加交换机设计复杂度的同时也严重影响了交换机的转发效率。

(3) 安全问题

网络控制云掌握着网络中所有的数据流,其安全性直接关系到网络的可用性、可靠性以及数据安全性,成为上述架构在移动通信网络中需要重点解决的问题。控制云的主要威胁包括:网络监听并伪造控制信令从而威胁网络资源配置、攻击者通过向控制云频繁发送虚假请求导致控制器因过载而拒绝提供服务等。同时,应用程序间安全规则需统一协调,防止安全规则冲突导致网络服务混乱和管理复杂度增加。

(4) 内容缓存

未来用户数据需求量的急剧增加导致网络数据流负荷增加,网络响应变慢。为了降低网络数据负荷和用户内容访问时延,提升用户体验,需要核心网与接入网对内容进行分布式存储与缓存,提高缓存命中率,提升缓存性能。考虑到无线接入侧基站存储空间限制,如何利用接入网集中控制的优势实现基站间协作缓存成为提升内容访问命中率、降低网络数据流量以及访问时延的关键研究点。

5 结束语

本文根据5G网络主要性能要求,从更高的数据流量和用户体验速率、更低时延、海量终端连接、更低成本以及更高效5个方面,讨论并分析了未来5G网络架构的主要技术特征。基于此提出了基于SDN和NFV的新型5G蜂窝网络架构,并针对5G网络架构可能存在的问题与挑战进行分析,为后续研究发展提供参考。

参考文献

- 1 5G NOW. 5th generation: non-orthogonal waveform of asynchronous signalling. <http://www.5gnow.eu>
- 2 METIS. Mobile and wireless communications enablers for the twenty-twenty information society. EU 7th Framework Programme Project. <http://www.metis2020.com>
- 3 IMT-2020 (5G) 推进组. 5G愿景与需求白皮书. <http://www.imt-2020.cn/zh/documents/listByQuery?currentPage=1&content>
- IMT-2020 (5G) Promotion Squad. 5G vision and Demand White Paper. <http://www.imt-2020.cn/zh/documents/listByQuery?currentPage=1&content>



- 4 ITU-R M. [IMT.Vision]. IMT Vision-Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. ITU Working Document 5D/TEMP/224-E, 2013
- 5 ICT-317669 METIS Project. Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System, 2013
- 6 Nokia Siemens Networks. 2020: Beyond 4G Radio Evolution for the Gigabit Experience. White Paper, 2011
- 7 Ericsson. More than 50 Billion Connected Devices. White Paper, 2011
- 8 Fettweis G, Alamouti S. 5G: personal mobile internet beyond what cellular did to telephony. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(2): 140~145
- 9 Osseiran A, Boccardi F, Braun V, *et al.* Scenario for 5G mobile and wireless communication: the vision of the METIS project. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(5): 26~35
- 10 Rusek F, Persson D, Buon K L, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40~60
- 11 Wunder G, Jung P, Kasparick M, *et al.* 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2): 97~105
- 12 Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, *et al.* Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! IEEE Access, 2013(1): 335~349
- 13 Jainy M, Choi J, Kim T, *et al.* Practical, real-time, full duplex wireless. Proceedings of International Conference on Mobile Computing & Networking, California, USA, 2011
- 14 Tehrani M N, Uysal M, Yanikomeroglu H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(5): 86~92
- 15 Bhushan N, Li J Y, Malladi D, *et al.* Network densification the dominant theme for wireless evolution into 5G. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2): 82~89
- 16 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. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551~563
You X H, Pan Z W, Gao X Q, *et al.* The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques. Science China Press, 2014, 44(5): 551~563
- 17 Agyapong P, Iwamura M, Staehle D, *et al.* Design considerations for a 5G network architecture. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(11): 65~75
- 18 Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell networks: a survey. IEEE Communication Magazine, 2008, 46(9): 59~67
- 19 Li Q C, Niu H N, Papathanassiou A T, *et al.* 5G network capacity: key elements and technologies. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 71~78
- 20 Ishii H, Kishiyama Y, Takahashi H. A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and phantom cell concept. Proceedings of IEEE Globecom Workshop, Anaheim, CA, USA, 2012: 624~630
- 21 Jin X, Li L, Vanbevery L, *et al.* Softcell: taking control of cellular core networks. Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, New York, USA, 2013: 163~174
- 22 Wang X F, Chen M, Taleb T, *et al.* Cache in the air exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2): 131~139
- 23 Erman J, Gerber A, Hajiaghayi M, *et al.* To cache or not to cache: the 3G case. IEEE Internet Computing, 2011, 15(2): 27~34
- 24 Ramanan B A, Drabek L M, Haner M, *et al.* Cacheability analysis of HTTP traffic in an operational LTE network. Proceedings of Wireless Telecommunication Symposium, Phoenix, AZ, USA, 2013: 1~8
- 25 Software-defined networking and network function virtualization-based approach for optimizing a carrier network with integrated datacenters. http://www.lsi.com/downloads/Public/Communication%20Processors/Axxia%20Communication%20Processor/LSI_WP_CarrierSDN.pdf
- 26 ONF. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks, 2012
- 27 ETSI ISG NFV. Network Functions Virtualization: Architectural Framework, 2013
- 28 Rost P, Bernardos C J, Domenico A D, *et al.* Cloud technologies for flexible 5G radio access networks. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(5): 68~76

[作者简介]



杨峰义,男,中国电信股份有限公司技术创新中心副主任、教授级高级工程师,“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组专家,国家高新技术研究发展计划(“863”计划)5G 专家组专家,中国通信标准化协会无线技术委员会副主席,中国通信学会无线及移动通信委员会委员,长期工作在移动通信领域,数次获得国家级和省部级科技进步奖,发表学术论文数十篇,学术专著 6 部,译著 1 部。

张建敏,男,博士,中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师,主要研究方向为移动通信技术。

谢伟良,男,博士,中国电信股份有限公司技术创新中心教授级高级工程师,主要研究方向为移动通信标准及测试。

王敏,女,中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师,主要研究方向为移动通信技术。

王海宁,女,中国电信股份有限公司技术创新中心工程师,主要研究方向为移动网络技术。