



发展 5G 的分析与建议

陈山枝

(大唐电信科技产业集团, 北京 100191)

摘要:首先简要介绍了 5G 在全球的研究进展,分析了 5G 的需求与挑战。分享了关于 5G 的几点再认识,指出 5G 是万物互联、连接场景的一代,电信 IT 化、软件定义、云化的一代,蜂窝结构变革的一代,承前启后和探索的一代。然后分析了 5G 无线传输和网络的关键技术,简要介绍了笔者团队提出的 PDMA、UUDN 和虚拟 RAT 等技术。特别指出了 TDD 在 5G 中的应用优势,并预测 5G 新空口将采用 TDD 模式。最后结合我国在 TD-SCDMA 和 TD-LTE 方面的创新经验,提出了关于我国实现“5G 引领”的建议。

关键词:5G;物联网;TDD 优势技术;大规模多天线;PDMA;超密集组网;SDN;NFV

中图分类号:TN929

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016185

Analysis and suggestion of future 5G directions

CHEN Shanzhi

Datang Telecom Technology and Industry Group, Beijing 100191, China

Abstract: Firstly, the global research progress of 5G was briefly introduced, and the requirements and challenges of 5G were analyzed. The understanding and views on 5G were shared, and 5G was pointed out as an internet of things generation, a telecom IT generation, software definition and cloud generation, a cellular structure transition generation, and serving as a link between the past and the future generation. Then, the key technologies of 5G wireless transmission and network were also analyzed, including PDMA, UUDN and virtual RAT technologies, which were proposed by the author's team. Particularly, the advantages of TDD in 5G was pointed, and the new air interface of 5G adopting TDD mode was predicted. At last, combined with China's innovative experience in TD-SCDMA and TD-LTE, suggestions on how to develop 5G in China were provided.

Key words: 5G, internet of things, TDD priority technology, massive MIMO, pattern division multiple access, ultra dense network, software defined networking, network function virtualization

1 引言

无线移动通信在 20 多年里得到了飞速的发展,给人们的生活、学习和工作方式以及政治、经济、社会等各方面都带来了巨大的影响。20 世纪末,中国提出的 TD-SCDMA

被国际电信联盟(ITU)接纳成为三大 3G 国际标准之一,实现了中国通信历史上的百年突破。随后,我国企业主导并拥有核心知识产权的 TD-LTE-Advanced(以下简称 TD-LTE),成为全球两大 4G 主流标准之一。目前,已有 43 个国家和地区推出了 67 个 TD-LTE 商用网络,TD-LTE 基站

收稿日期:2016-04-23;修回日期:2016-07-08

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(No. 61425012)

Foundation Item: Distinguished Young Scholar Award of National Natural Science Foundation (No. 61425012)



数达 140 万套,占 4G 基站总数的 43%;TD-LTE 用户数达 4.7 亿户,占全球 4G 用户总数的 40%。TD-LTE 在与美国企业主导的 WiMAX 的产业竞争中胜出,全球 90% 的 WiMAX 网络将升级到 TD-LTE^[1]。TD-LTE 已成为全球 TDD 技术共同演进的方向,发展空间巨大。

自 2012 年初 WRC-12 上 ITU 通过了 4G 标准之后,通信业界开始研究 5G。各国成立了专门组织推进 5G 研究,争抢新一轮技术和标准的影响力和制高点。例如,欧盟启动了 METIS、5GNow 等多个 5G 预研项目,并成立了 5GPPP;韩国成立了 5G Forum 等;美国和日本也启动了 5G 研究。《IEEE Communications Magazine》在 2014 年 2 月和 5 月出版了两期关于 5G 的技术专题^[2]。

2013 年 2 月,我国由工业和信息化部(以下简称工信部)、科技部、国家发展和改革委员会(以下简称国家发展改革委)等发起成立 IMT-2020(5G)推进组^[3],目标是在“3G 突破、4G 同步”的基础上,实现“5G 引领”全球。为配合该目标,国家“863”计划、国家重大科技专项及地方政府等分别设置了 5G 相关研究课题。IMT-2020(5G)推进组前期完成了 5G 的需求、概念、无线技术和网络技术的分析^[4-7],且有多项成果输入 ITU。

我国 IMT-2020(5G)推进组分析了驱动 5G 发展的移动互联网和移动物联网两类业务需求,提出了包括 6 项性能指标和 3 项效率指标的“5G 需求之花”^[4],定义了广域覆盖、热点覆盖、低功耗大连接物联网和低时延高可靠物联 4 类 5G 主要应用场景。ITU 将 5G 需求和应用场景主要分为 3 类:增强的移动宽带(eMBB)(将我国提出的广域覆盖、热点覆盖归为此类)、海量连接的机器类通信(mMTC)、超可靠和低时延通信(cMTC)。同时定义了 8 项关键技术指标,表 1 中列出了 5G 相对 4G 的各个关键能力提升的倍数。

事实上,5G 不再仅仅是上面分析到的更高速率、更大带宽、更强能力的空中接口技术,而且是面向用户体验、业务应用和行业应用的智能无线网络。需要指出的是,5G 对应的是多种不同应用场景,需要的是一组不同能力指标,即表 1 中的所有指标不是也不可能同时满足和达到。上述

5G 的速率、流量密度、连接密度等关键指标要求带来了在技术、频率、运营等方面的巨大挑战。

2 关于 5G 的几点再认识

(1) 5G 是万物互联、连接场景的一代

5G 是移动通信从 1G 到 4G 主要以人与人通信为主,跨越到人与物、物与物通信的时代。5G 是万物互联和连接场景的时代。从业务和应用的角度,5G 具有三大特点:大数据、海量连接和场景体验,满足未来更广泛的数据和连接业务需要,提升用户体验。

数据和连接是信息社会的时代特征。全球化将进入一个新纪元,一个由数据和连接传递信息、思想和创新的新时代。5G 将应时而生。

(2) 5G 是电信 IT 化、软件定义的一代

5G 将是全新一代的移动通信技术,5G 网络呈软件化、智能化、平台化趋势,是通信技术(CT)与信息技术(IT)的深度融合,是电信 IT 化的时代。

软件定义的 5G,包括采用通过软件定义网络(software defined networking,SDN)和网络功能虚拟化(network function virtualization,NFV)以及软件定义无线电的无线接入空口,实现 5G 可编程的核心网和无线接口。SDN 和 NFV 将引起 5G 的 IT 化,包括硬件平台通用化、软件实现平台化、核心技术 IP 化。运营商能在通用硬件基础上加载专用软件实现 5G 设备运行,IT 化对于传统电信设备制造商将是一个挑战。就像 Google(谷歌)和百度等定制服务器一样,给 IBM 和 HP 等传统服务器厂商带来挑战。

(3) 5G 是云化的一代

5G 的云化趋势包括:基带处理能力的云化(云架构的 RAN,即 C-RAN)、采用移动边缘内容与计算(mobile edge content and computing,MECC)、终端云化。

C-RAN 是将多个基带处理单元(baseband unit,BBU)集中起来,通过大规模的基带处理池为成百上千个远端射频单元(remote radio unit,RRH)服务。此时,基带处理能力是云化的虚拟资源。逻辑集中的控制增加了系统的灵活

表 1 5G 关键指标

关键指标	流量密度	连接密度	时延	移动性	能效	用户体验速率	谱效	峰值速率
ITU 5G 取值	10 Tbit/s/km ²	1 M/km ²	1 ms	500 km/h	100 倍	100 Mbit/s	3 倍	10 Gbit/s
LTE 能力	100 Gbit/s/km ²	0.1 M/km ²	10 ms	350 km/h	1 倍	10 Mbit/s	1 倍	0.6 Gbit/s
5G 比 4G 提升/倍	100	10	10	2	100	10	3	30

性,方便升级。C-RAN减少了基站机房数量,可以大幅度降低建设和运维成本,同时还能大幅度降低能耗。但存在的问题与挑战是BBU与RRU间的前传(fronthaul)带宽开销大(以LTE为例,3个扇区的单个小区的带宽就在16 Gbit/s左右)以及引起的额外时延问题。

5G将采用MECC,即在靠近移动用户的位置上提供IT服务环境和云计算能力,使应用、服务和内容部署在分布式移动环境中,针对资源密集的应用(如图像、视频、制图等),将计算和存储卸载到无线接入网,从而降低了对通信带宽的开销,并提高了实时性。

5G的终端云化,随着集成电路技术的进步,未来移动终端能力和资源(包括计算、存储、传感等)将得到大幅提升,也可以实现本地资源共享和云化,特别是在社交网络应用中。

(4) 5G是蜂窝结构变革的一代

从1G到4G都是基于传统的蜂窝系统,即形状是基本规则(六边形)的蜂窝小区组网,且是一个干扰受限系统。目前,密集高层办公楼宇、住宅和场馆等城市热点区域承载了70%以上的无线分组数据业务。为了解决容量和干扰问题,新技术不断引入,如分布式天线、多输入多输出(MIMO)、多用户检测、基站间协作(CoMP)和中继等。而热点区域的家庭基站、无线中继站、小小区基站和分布式天线等(统称异构基站)大多数呈非规则、无定形部署特性和层叠覆盖,形成了异构分层无线网络。

结合虚拟网络运营商(virtual network operator, VNO)需求,产生了虚拟接入网(virtual RAN, VRAN)与虚拟小区的概念。VRAN就是可以在一个物理设备上按需产生多个RAN实例,5G提供了RAN即服务(RAN-as-a-service, RANaaS)。

可见,传统单层规则的蜂窝小区概念已不存在,移动通信首次出现了去蜂窝的趋势,5G将是蜂窝结构变革的一代。

(5) 5G是承前启后和探索的一代

移动通信技术更新约10年一代。1G的目的是要解决语音通信,但语音质量与安全性都不好;到2G时,GSM和CDMA在解决语音通信方面达到极致;1998年提出的3G最初目标是解决多媒体通信(如视频通信),但2005年后出现移动互联网接入的重大应用需求,不过解决得不好;LTE对移动互联网接入需求的解决是到位的,但又面临语音通信(VoLTE)问题。

笔者认为,目前呈现的是“1G短、2G长、3G短、4G长”

的特征,那5G呢?5G的目标是要解决万物互联,但目前还没有得到垂直行业(物联网、工业互联网等)的正面回应。因此,未来需求到底是什么?产业生态是什么?现在都只是通信技术专家们的设想,正如1998年提出的3G。因此,5G极有可能与3G类似,是一个相对短暂的一代。但有一点是肯定的,5G将是有探索价值的一代,是移动通信历史上迈向万物互联的承前启后的一代。

3 5G无线传输关键技术

从技术标准架构看,5G无线接入技术涉及帧结构、双工模式、波形、多址接入、编码调制、天线、接入控制协议等。大唐电信科技产业集团(以下简称大唐电信)在2013年发布了5G白皮书^[8],随后我国IMT-2020(5G)推进组梳理了5G无线侧关键技术^[9],主要有大规模多天线、新型多址接入、超密集组网、高频段通信、低时延高可靠物联网、灵活频谱共享、新型编码调制、新型多载波、M2M、D2D(device to device)、灵活双工、全双工共12项关键技术。

当前5G关键技术开始收敛。笔者认为:大规模多天线和新型多址接入技术可以提升频谱效率,构成“任何时间、任何地点”确保用户体验的关键技术;超密集组网和高频段通信技术可以提升热点流量和传输速率,基于LTE-Hi演进技术的能力提升;低时延高可靠物联网技术可以拓展业务应用范围,将成为5G物联网应用(如工业互联网、车联网)的关键使能技术。

3.1 大规模多天线

传统的无线传输技术主要是挖掘时域与频域资源,20世纪90年代,Turbo码的出现使信息传输速率几乎达到了香农极限。多天线技术将信号处理从时域和频域扩展到空间域,从而提高了无线频谱效率和传输可靠性。多天线技术经历了从无源到有源,从二维到三维,从高阶MIMO到大规模阵列天线的发展。

从香农信息论可知,从1G到3G,通过调制与编码等技术进步来提高信噪比实现容量提升的方法已接近极限,但MIMO技术可以在空间域上进一步有效地提高信噪比。理论上,MIMO系统容量与天线数成正比,即增加天线数可以线性地增加系统容量。当基站侧天线数远大于用户天线数时,基站到各个用户的信道将趋于正交。此时,用户间干扰将趋于消失,而巨大的阵列增益将有效地提升每个用户的信噪比,从而能在相同的时域和频域资源中共同调度更多用户。

随着关键技术的突破,特别是射频器件和天线等技术



的进步,使多达 100 个以上天线端口的大规模多天线技术在 5G 应用成为可能,是目前业界公认应对 5G 在系统容量、数据速率等方面挑战的标志技术之一。在实际应用中,通过使用大规模多天线阵列,基站可以在三维空间形成具有更高空间分辨率的高增益窄细波束,从而实现更灵活的空间复用能力和改善接收端接收信号,并且更窄波束可以大幅度降低用户间干扰,从而实现更高的系统容量和频谱利用效率^[9]。

大规模多天线技术在 5G 中的潜在应用场景包括宏覆盖、高层建筑、异构网络、室内外热点及无线回传链路等。在广域覆盖场景,大规模多天线技术可以利用现有频段;在热点覆盖或回传链路等场景中,则可以考虑使用更高频段。

当前,大规模多天线技术面临的挑战包括:基带运算的复杂度、处理时间和成本问题;信道测量性能和信道状态信息反馈的导频开销问题;相位噪声与校正问题等。主要研究方向包括:高效信号处理技术、信道建模及系统性能分析技术、信道状态信息获取技术、成形码本的设计、多用户调度与资源管理技术、大规模有源阵列天线技术、覆盖增强技术以及高速移动解决方案。

包括大唐电信在内的我国企业从 TD-SCDMA 开始,首次在全球将智能天线波束成形技术引入蜂窝移动通信系统,并且在 TD-LTE 中拓展到 8 天线多流波束成形技术,实现了波束成形与空间复用的深度融合,在国际上领先,且已经在全球商用,性能得到业界认可。目前大部分商用 FDD LTE 仍采用 2 天线(部分采用 4 天线)。在多天线技术方面,FDD 落后于 TDD。可见,TD-LTE 的多天线多流波束成形技术成果为我国企业在 5G 大规模多天线及波束成形的技术研究、标准与产业上取得了先机。

3.2 5G 新型多址接入技术:PDMA^[10]

多址接入技术是解决多用户进行信道复用的技术手段,是移动通信系统的基础性传输方式,关系到系统容量、小区构成、频谱和信道利用效率以及系统复杂性和部署成本,也关系到设备基带处理能力、射频性能和成本等工程问题。多址接入技术可以将信号维度按照时间、频率或码字分割为正交或者非正交的信道,分配给用户使用。历代移动通信系统都有其标志性的多址接入技术作为其革新的标志。例如:1G 的模拟频分多址接入(FDMA)技术;2G 的时分多址接入(TDMA)和频分多址接入(FDMA)技术;3G 的码分多址接入(CDMA)技术;4G 的正交频分复用

(OFDM)技术。1G 到 4G 采用的都是正交多址接入技术。对于正交多址接入,用户在发送端占用正交的无线资源,接收端易于使用线性接收机来进行多用户检测,复杂度较低,但系统容量会受限于可分割的正交资源数目。从单用户信息论角度,LTE 的单链路性能已接近点对点信道容量,提升空间十分有限;若从多用户信息论角度,非正交多址技术还能进一步提高频谱效率,也是逼近多用户信道容量上界的有效手段。

因此,若继续采用传统的正交多址接入技术,难以实现 5G 需要支持的大容量和海量连接数。理论上,非正交多址接入将突破正交多址接入的容量极限,能够依据多用户复用倍数来成倍地提升系统容量。非正交多址接入需要在接收端引入非线性检测来区分用户,得益于器件和集成电路的进步,目前非正交已经从理论研究走向实际应用。

图样分割多址接入(pattern division multiple access, PDMA)技术^[10],是大唐电信在早期 SAMA(SIC amenable multiple access)^[11]研究基础上提出的一种新型非正交多址接入技术,它采用发送端与接收端联合优化设计的思想,将多个用户的信号通过 PDMA 编码图样映射到相同的时域、频域和空域资源进行复用叠加传输,这样可以大幅度地提升用户接入数量。接收端利用广义串行干扰删除算法实现准最优多用户检测,逼近多用户信道容量界,实现通信系统的整体性能最优。PDMA 技术可以应用于通信系统的上行链路和下行链路,能够提升移动宽带应用的频谱效率和系统容量,支持 5G 海量物联网终端接入。PDMA 技术自提出就受到了业界的广泛关注,2014 年,PDMA 技术被写入 ITU 的新技术报告 IMT-Trend^[12]。

大唐电信对 PDMA 的仿真评估表明:PDMA 能够使得系统下行频谱效率提升 50%以上,上行频谱效率提升 100%以上;采用 PDMA 与 OFDM 结合的接入方式时,能支持的终端接入数量,相对于 4G 提升 5 倍以上。目前,大唐电信正在开发 PDMA 原型系统。

3.3 双工模式

双工模式是指如何实现信号的双向传输。时分双工(TDD)是通过时间分隔实现信号的发送及接收;频分双工(FDD)是利用频率分隔实现信号的发送及接收。从 1G 到 4G,GSM、CDMA、WCDMA 和 FDD LTE 都是 FDD 系统,我国企业主导的 TD-SCDMA 和 TD-LTE 都是 TDD 系统。最新的研究方向是全双工。

全双工是指同时、同频进行双向通信,即无线通信设

备使用相同的时间、相同的频率,同时发射和接收无线信号,理论上可使无线通信链路的频谱效率提高1倍。由于收发同时同频,全双工发射机的发射信号会对本地接收机产生干扰。根据典型蜂窝移动通信系统不同的覆盖半径,天线接头处收发信号功率差通常在100~150 dB,如何简单有效地消除如此大的自干扰是个难题,还有邻近小区的同频干扰问题以及工程实现上的电路小型化问题。目前实现自干扰抑制主要有空域、射频域和数字域联合等技术方案,研究以高校的理论分析和技术试验为主,还没有成熟的产品样机和应用。另外,全双工在解决无线网络中的某些特殊问题时有优势,如隐藏终端问题和多跳无线网络端到端时延问题。

灵活双工是指能够根据上下行业务变化情况,灵活地分配上下行的时间和频率资源,更好地适应非均匀、动态变化或突发性的业务分布,有效提高系统资源的利用率。灵活双工可以通过时域、频域的方案实现,若在时域实现,就是同一频段上下行时隙可灵活配比,也就是TDD方案;若在频域实现,则存在多于两个频段时,可以灵活配比上下行频段;若在传统FDD上下行的两个频段中,上行频段的时隙配置实现可灵活时隙配比,则是TDD与FDD融合方案,可应用于低功率节点,但这需要调研各国频率政策,分析现有政策是否允许此方式。

目前产业界公认在LTE演进上主要定位TDD+,认为在5G低频段将采用FDD和TDD,在高频段更宜采用TDD。由于TDD模式能更好地支持5G关键技术(如大规模多天线、高频段通信等)。笔者预测,全双工在5G上的应用将有限,TDD和FDD都会得到应用且融合发展,但TDD在5G解决大容量和频段中会起到主导应用,而且5G新空口极可能采用TDD模式^[13],第5节将会有专门的分析与讨论。

3.4 超密集组网

据参考文献[14]统计,在1950~2000年的50年间,相对于语音编码和调制等物理层技术进步带来不到10倍的频谱效率提升和采用更大的频谱带宽带来的传输速率几十倍的提升,通过缩小小区半径(即频谱资源的空间复用),带来的频谱效率可以提升2700倍以上。可见,网络密集化是5G应对移动数据业务大流量和剧增系统容量需求的重要手段之一。网络密集程度可以用单位面积内部署的天线数量来定义,有两种手段可以实现:多天线系统(大规模多天线或分布式天线系统等)和小小区的密集部署。

后者就是超密集组网,即通过更加“密集化”的基站部署,单个小区的覆盖范围大大缩小,以获得更高的频率复用效率,从而在局部热点区域提升系统容量达百倍。典型应用场景主要包括办公室、密集住宅、密集街区、校园、大型集会、体育场、地铁和公寓等。

随着小区部署密度的增加,超密集组网将面临许多新的技术挑战,如回传链路、干扰、移动性、站址、传输资源和部署成本等。为了实现易部署、易维护、用户体验佳,超密集组网的研究方向包括小区虚拟化、自组织自优化、动态TDD、先进的干扰管理和先进的联合传输等。笔者提出了以用户为中心的超密集组网(UUDN)^[15]。UUDN突破传统以网络为中心的理念,基于去蜂窝化的思想,采用更加贴近用户的本地控制管理中心构建以用户为中心的虚拟伴随小区,通过高效的移动性管理,实现网随用户动。同时,系统智能感知用户需求和网络状态,按需选择合理的接入方式和传输方式,实现以用户为中心的业务传输。另外,以用户为中心的超密集网络还引入了先进的干扰管理、灵活的无线回传、智能的网络编排、网络自优化等先进特性,以提升网络容量和区域频谱效率,降低部署和维护成本,提升用户体验。

3.5 先进的频谱利用技术

(1) 高频段无线传输技术

目前,蜂窝移动通信系统工作频段主要在3 GHz以下,用户数的增加和更高通信速率的需求,使得频谱资源十分拥挤,而在6 GHz以上高频段具有连续的大带宽频谱资源。目前产业界研究6~100 GHz的频段(称为毫米波,mmWave)来满足5G对更大容量和更高速率的需求,传送高达10 Gbit/s甚至更高速率的数据业务。

高频通信已应用在军事通信和无线局域网方面,但在蜂窝通信领域的应用研究尚处于起步阶段。频段越高,信道传播路径损耗越大,因此小区覆盖半径将大大缩小。在一定区域内基站数量将大大增加,即形成UDN。高频信道与传统蜂窝频段信道有明显差异,存在如传播损耗大、穿透能力有限、信道变化快、绕射能力差和移动性支持能力受限等问题,需要深入研究高频信道的测量与建模、高频新空口和组网技术。另外,研制大带宽、低噪声、高效率、高可靠性、多功能和低成本的高频器件,仍是产业化的瓶颈,而我国产业在此方面差距更大。

(2) 动态频谱共享技术

据产业界预测,到2020年移动通信频率需求总量



为 1 390~1 960 MHz,我国预测结果为 1 490~1 810 MHz,频率缺口达到 1 GHz。频率短缺矛盾凸显,虽经 IMT 产业界努力争取,但从 2015 年国际无线电大会(WRC-15)会议结果看,没有任何一个国家和地区新划分的总量超过 300 MHz,远不能满足 5G 需求。况且,期望 WRC-19 最终获得的频率划分并不乐观。

美国频谱政策工作组(SPTF)调查^[16]表明:85%已规划的无线电频率在不同时间和地区部分或全部未被使用。欧洲的频谱测量^[17]表明:400 MHz~3 GHz 频段的频率利用率低于 11%。因此,在频率资源越来越紧张的情况下,为满足 5G 需求,在尽力争取更多 IMT 专用频谱外,提高已有 IMT 频谱的使用效率尤为重要。引入新型的频谱管理理念,通过频谱共享技术结合 5G 其他关键技术,可联合使用现有 IMT 频段和频段来满足 5G 需求。

频谱共享的主要应用场景包括:运营商内无线接入技术(RAT)间的频谱共享、运营商间频谱共享、免授权频段的频谱共享和次级接入频谱共享等,缓解运营商频谱过饱或过闲置,提升运营商总频谱资源使用效率。

频谱共享技术具备跨不同网络或系统的最优动态频谱配置和管理功能,具备智能自主接入网络和网络间切换的自适应性功能,目标是实现高效、动态和灵活的频谱使用,以提升空口效率、系统覆盖层次和密度等,从而提高频谱综合利用效率。

认知无线电指通过对空闲频谱的探测与机会式占用,在扩展系统自身可用频谱资源的同时,保证对所占频谱的原授权系统无有害干扰。频谱共享是更广义的频谱使用技术,包括异系统间、多 RAT 间、系统内小区间和不同制式间等的频谱共享。共享者之间可以是对频谱具有相同占用等级或者不同占用等级。在频谱共享技术中,可以利用认知无线电技术进行频谱探测,也可以通过对频谱数据库的查询来获取可用频谱资源,继而对频谱进行高效的频谱管理,使得频谱资源在共享者之间得到最大化的利用率。

目前,频谱共享技术需要研究的关键技术与问题,包括新型网络架构及新增的无线接口设计、频谱检测机制和算法、数据库结构和频谱地图生成与管理、频谱资源的高效管理与分配、支持灵活带宽和工作频点的新型射频和多系统整合带来的安全性技术问题等。从工程实现上,对基带算法与器件能力提出了更高要求。另外,频谱共享技术需要国家频谱管理政策的支持,研究新的经济模型,制定新的使用规则、安全策略等。

3.6 多种 RAT 与虚拟 RAT^[18]

目前,产业界达成共识:5G 将包含 LTE 演进和新无线空口。LTE 演进在第 5.1 节会有介绍。针对 5G 新空口,由于 5G 的不同场景应用(eMBB、mMTC 和 mMTC 等)需求差异很大,很难通过一种 RAT 实现。因此不会像 1G 至 4G 时某一制式是单一 RAT,而 5G 极可能是一个多 RAT 的时代。从另一角度看,1G 至 4G 是多个标准制式/体系(如 2G 时的 GSM 和 CDMA)间的竞争,而在 5G 时,极可能变成了一个标准体系内不同 RAT 间的竞争。

在 5G 多 RAT 情况下,笔者团队提出了虚拟 RAT(virtual RAT)^[18],包括总体架构与协议栈,通过控制面和用户面分离定义无线空口集实现多个异构 RAT 协同,提供灵活和可定制的接入网。

4 5G 网络关键技术

从技术标准架构看,5G 网络技术涉及移动性管理、接入控制、连接管理等功能。我国 IMT-2020(5G)推进组梳理了 5G 核心网络的系列关键技术^[7],主要有控制转发分离、控制功能重构、新型连接管理和移动性管理、移动边缘内容与计算、按需组网、统一的多无线接入技术融合、无线网状网和动态自组织网络、无线资源调度与共享、用户和业务的感知与处理、定制化部署和服务以及网络能力开放等关键技术。

传统的移动通信网络难以做到网络资源的动态调整和按需分配,无法实现根据用户和业务需求进行可编程操作,造成部署新业务的周期长、成本高等。5G 网络将向扁平化方向发展,控制与转发分离的软件定义网络(SDN)、硬件与软件分离的网络功能虚拟化(NFV)成为 5G 网络的关键支撑技术,以实现 5G 网络能根据业务需求灵活动态组网、提升网络整体效率和降低总成本。

4.1 软件定义网络和网络功能虚拟化

SDN 始于学术研究和数据中心,是一种网络设计理念和新型开放网络架构,具有控制与转发分离、控制逻辑集中和网络可编程三大特征。控制器具有全局网络信息,负责调度网络资源和制定转发规则等,网络设备仅提供简单的数据转发功能。层间采用开放的统一接口(如 OpenFlow 等)进行交互,这样有利于实现网络连接的可编程。

NFV 由电信运营商联盟提出,是一种软件与硬件分离的架构,通过 IT 虚拟化技术,采用产业界标准的服务器、存储设备和交换机等硬件基础设施,通过加载软件

实现功能重构和网络智能编排,以降低设备成本、加快网络和业务的部署速度,改变过去由专用硬件设备来部署的被动局面。

由此可见,SDN和NFV具有很强的互补性,尽管两个概念和解决方案可以融合应用,但是并不相互依赖。SDN控制网络的动态连接,NFV实现灵活的网络功能,SDN和NFV可以互为使能。

多种类型的业务和多样化的通信场景对5G网络提出了多样化的性能需求,而这些多样化的性能需求显然无法通过统一的网络架构来保证。5G需要支持多种不同类型的业务,对应的应用场景差异很大,如mMTC的海量连接物联网,eMTC的低时延、高可靠的车联网和工业互联网应用等,其安全性的要求也不相同。5G将基于SDN和功能重构的技术设计新型网络架构,提高网络面向5G复杂场景下的整体接入性能;基于NFV按需编排网络资源,实现网络切片和灵活部署,满足端到端的业务体验和高效的网络运营需求。5G的NFV将从核心网向无线接入网推进,但如何有效实现无线资源虚拟化还需深入研究。

5G网络需具备虚拟化切片的能力,使得每个网络切片能够适配不同的业务和通信场景,以提供合理的网络控制和高效的资源利用。网络切片是指将物理网络通过虚拟化技术分割为多个相互独立的虚拟网络。每个网络切片中的网络功能可以在定制化的裁剪后,通过动态的网络功能编排形成一个完整的、实例化的网络架构。通过为不同的业务和通信场景创建不同的网络切片,使得网络可以根据不同的业务特征采用不同的网络架构和管理机制,包括合理的资源分配方式、控制管理机制和运营商策略,从而保证通信场景中的性能需求,提高用户体验以及网络资源的高效利用。

软件定义与可编程的优点是能感知环境与业务、提供基于场景的业务和应用、方便网络能力开放。但同时,SDN和NFV带来了5G网络和业务运维的新问题。5G采用通用硬件平台,带来了比传统专用通信硬件的低可靠性问题,与5G服务工业互联网、车联网等的高可靠性矛盾。因此,还需进一步研究如何提高在通用硬件平台上实现电信协议的可靠性,如容错系统设计。

4.2 动态自组织网络

在传统的移动通信网络中,网络部署、运维等基本依靠人工的方式,需要投入大量的人力,给运营商带来巨大挑战。SON是在网络中引入自组织能力(网络智能化),包

括自配置、自优化、自愈合等,实现网络规划、部署、维护、优化和排障等各个环节的自动进行,最大限度地减少人工干预,降低成本、提高效率。

从第3节得知:5G将是融合、协同的多制式共存的异构网络。从技术上看,将存在多层、多类型无线接入技术的共存,导致网络结构非常复杂。各种无线接入技术内部和各种覆盖能力的网络节点之间的关系错综复杂,特别是超密集组网的引入,导致无线参数的急剧增加,网络的部署、运营、维护将成为一个极具挑战性的工作。为了缩短建设周期、降低运营维护复杂度和成本,未来5G网络需要SON功能,能统一实现多个异构无线接入技术、多种覆盖层次的联合自配置、自优化、自愈合。

4.3 移动边缘内容与计算

笔者认为,5G的移动内容云化有两个趋势:从传统的中心云到边缘云(即移动边缘计算),再到移动设备云。

由于智能终端和应用的普及,使得移动数据业务的需求越来越大,内容越来越多。为了加快网络访问速度,需要将内容存储和分发能力下沉到无线接入网中,基于对用户的感知,按需智能推送内容,提升用户体验。因此,在无线网络中采用内容分发网络(content delivery network, CDN)技术成为自然的选择,即无线基站增加计算与存储能力,构成了分布式CDN,就是移动边缘内容与计算(MECC)。MECC还可以开放实时的无线网络信息,为移动用户提供个性化、上下文相关的体验。MECC适合应用于新兴的智能应用,如增强现实、移动办公、智能家居、物联网和移动游戏等。

在移动社交网络中,通常流行内容会得到在较近距离范围内的大量移动用户的共同关注。同时,由于技术进步,移动设备成为可以提供剩余能力(计算、存储和上下文等)的“资源”,可以是云的一部分,即形成池化的虚拟资源,从而构成移动设备云。

4.4 安全可信的网络空间

5G提供数据、连接和基于场景的服务,人、物与网络高度融合的场景化时代即将来临。现实空间与网络空间交织发展,安全成为支撑5G健康发展的关键要素。

面向信息消费、工业生产、互联网金融、教育医疗、智能交通和公共管理等典型应用场景,5G网络需要提供安全可靠的网络通信和服务平台,并能够保护用户隐私,同时支持国家和社会维护网络空间秩序。在传统接入安全、传输安全的基础上,5G需要实现网络空间与现实空间的有效



映射,提供满足不同应用场景的多级别安全保证,网络实体自身具备安全免疫能力,构建安全可信的网络空间。

大唐电信发布的 5G 网络安全白皮书^[19]分析了未来 5G 移动宽带系统的一些典型应用场景,站在用户、网络和服务平台提供者、社会和政府的不同角度分析了 5G 的安全需求;提出了 5G 网络安全的 3 个核心要素:身份可信、网络可信和实体可信,并对主要的安全技术方向进行了研讨。

5 TDD 在 5G 中的优势和角色^[13,20]

从 5G 自身特点来看,TDD 相比 FDD 更有优势。主要原因如下。

- TDD 可以利用上行信道以及下行信道的互易性、低复杂度和低成本获取复杂无线环境下的信道信息,更好地支持大规模多天线、超密集组网等应用。
- 5G 系统在频谱上需要更大的带宽,并向更高频段拓展,比如 6 GHz 及以上,TDD 使用非成对的单一频谱,更容易获得大带宽的新频段或空闲频段。因此,TDD 更易于实现高频段通信、灵活频谱共享等应用。
- TDD 更易于实时且灵活地调整上行以及下行带宽的比例配置,更好地匹配大量下载或上传的业务突发情况,提升系统效率。

可以预期,面向 5G,TDD 制式将获得全球移动通信业界更多的关注、研究以及商用。下面介绍 TD-LTE 向 5G 演进的 TDD+技术^[21]及 5G 中 TDD 优势技术^[13,20]。

5.1 TDD+:向 5G 演进的 TDD 系列增强技术

3GPP 在 2016 年初启动 5G 研究,计划将 R14 和 R15 当作 5G 的基础版本,R16 作为 5G 的正式版本。关于 5G,参与 3GPP 的各公司的共识是“5G=LTE 演进+新空口”,其中,LTE 演进主要在低频段,新空口同时包括低频段和高频段。

考虑到 5G 商用还有 5 年,为了实现 TD-LTE 网络在满足 5G 商用之前的更多需求(如提升容量和连接数、降低时延等),TD-LTE 全球联盟(GTI)提出了 TDD+的

概念^[21],系列 TDD 增强技术包括:TDD-FDD 载波聚合、动态 TDD、全维度 MIMO、三维(3D)波束成形、LTE-Hi 和机器类通信(machine type communication, MTC),GTI 将 TDD+看成是 TD-LTE 向 5G 平滑演进的桥梁。与此相关的 5G 中 TDD 优势技术包括大规模多天线、超密集组网、高频段通信、灵活频谱共享和低时延高可靠等,如图 1 所示。

5.2 5G 中 TDD 优势技术^[13,20]

(1) 基于 TDD 的大规模多天线

大规模多天线应用的一个重要假设是信道具备互易性。否则,要依靠信道测量与反馈的开销将非常巨大,系统设计和实现都变得异常复杂。

FDD 系统的频点间相差较远,在实际中,由于频率选择性问题,可能在一个频点上某个方向能量强一些,而在另一个频点上可能是另一个方向能量强。因此,FDD 的信道互易性较差。在 FDD 系统中,基站侧需要针对每个天线发送导频信息,终端侧需要对下行信道测量合成后反馈给基站。因此,FDD 需要信道估计和反馈的导频开销将随着天线数的增多而增大。基站上百根天线的导频设计需要耗费大量的时频资源,因此,实际应用中采用基于导频的信道估计方式是不可取的。

TDD 有天然的优势,由于在相同的频点发送和接收,只是时间上有区分。在实际中,认为信道是互易的。这样,TDD 系统就可以利用信道互易性进行信道估计,不需要额外的开销进行信道估计,只需要终端侧发送导频信息,即开销与天线数量无关。

(2) 基于 TDD 的超密集组网

UDN 主要解决热点区域的成百倍系统容量的提升问题,通过高频段实现短距离的高速率通信。超密集组网更适合 TDD 系统,主要体现在 TDD 模式的上行和下行灵活配置,更易于满足超密集组网对应的上下行业务不对称需求;TDD 模式更易于小蜂窝覆盖和灵活组网;在高频段更获得成对的大带宽频段相对困难,高频段更适合 TDD 模式的应用。

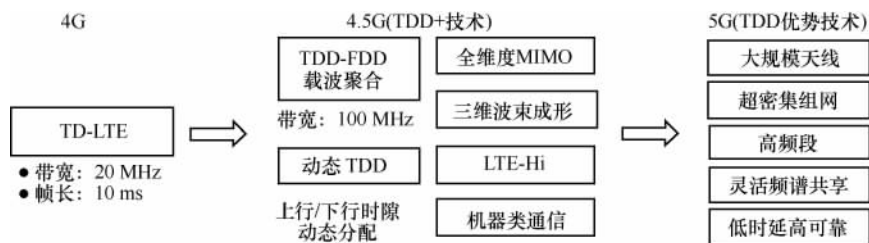


图1 TDD+所包含的系列技术和 5G 中 TDD 优势技术

(3) 基于 TDD 的设备直通和车联网

D2D 是指两个对等设备间直接进行通信的方式。传统的蜂窝用户设备(终端)只需在上行具备发送能力及在下行具备接收能力,而 D2D 要求终端能在上下行的资源上同时具备发送和接收的能力,所以对于终端的能力和复杂度有很大的影响。

对于 FDD 系统来说,接收 D2D 信息的终端必须具备在上行频段接收、解调信号的能力,终端的射频和基带都要升级。而对于 TDD 系统而言,因为上、下行使用相同的频段,接收 D2D 的终端必须具备在上行时隙接收、解调信号的能力,终端的基带要升级,但射频不需要改动,硬件改动较小。因此,相对于 FDD 系统,D2D 在 TDD 系统中的应用更有优势。车联网中的主要业务类型是终端之间的广播业务,在终端构成网络的拓扑结构为无线网状结构,不存在统一的中央节点,收发均集中于相同的频段上。因此,D2D 和车联网的工作方式,都更接近于蜂窝系统中的 TDD 模式,TDD 技术将成为 D2D 和车联网中的唯一技术。

(4) 基于 TDD 的高频段通信和动态频谱共享

在高频段要获得成对的大带宽频段相对困难,因此高频段更适合 TDD 技术的应用。现有的在高频段工作的系统,例如 IEEE 802.11ad,都是以 TDD 模式在工作。

无论是在机会式的空闲频段,还是在免授权频段,甚至是多运营共享使用的特定频段,要找到成对的频段是十分困难的,因此频谱共享技术更适合采用 TDD 模式。

综上分析,笔者认为 TDD 将是 5G 的主要组成部分,特别是 5G 新空口极可能采用 TDD 模式。而我国企业从 TD-SCDMA 到 TD-LTE 长期在 TDD 领域积累的技术、标准与产业优势,将得到更大程度的发挥。

6 关于实现我国 5G 引领的建议

在技术突破、标准制定方面,我国学术界和产业界经过 3G 和 4G 近 20 年的积累,已具备系统创新的能力。但 5G 的系统要求、设计难度和应用场景复杂度等更高!在系统设计、标准制定上必然将更加复杂和关键!

突破 5G 核心技术,是取得 5G 国际标准制定话语权和引领产业的根本。另外,5G 的竞争将不仅是通信基础技术的竞争,而且是核心器件等基础产业的全产业链竞争、面向行业应用的新产业生态竞争。

因此,在推动 5G 发展中,需要特别提升 3 个能力:系统及标准体系的设计和推动能力;基础产业能力,包括器

件、芯片、软件等能力;垂直行业的整合及应用推广能力(如工业互联网、车联网等)。

我国如何才能实现 5G 引领的战略目标呢?建议采取“发挥优势、引领标准,政策引导、率先示范,突破瓶颈、带动行业”的整体战略。具体描述如下。

(1) 发挥优势、引领标准

当前,我国已在从 TD-SCDMA 到 TD-LTE 的持续创新中,积累形成了 TDD 领域(包括多天线多流波束成形技术等)在全球的技术与产业优势。而且依据 5G 的整体特点,TDD 将会在 5G 中发挥更大的作用,大规模多天线等具有 TDD 应用优势的关键技术将成为 5G 标志性技术。建议要立足发挥 TDD 技术优势,确保实现对 5G 标准的引领。

(2) 政策引导、率先示范

我国应尽早发布对国际有影响力和引导作用的产业政策,尽早为 5G 发布丰富优质的频谱资源。加快推进研发、标准化和产业化等进度,率先启动关键技术实验,保证技术的先进性和完整性,提升国际影响力和标准话语权。

(3) 突破瓶颈、带动行业

发挥产业带动作用,5G 要在具有国际竞争力的 TDD 产业链、4G 带动我国集成电路技术与产业进步的基础上,“纵向提升、横向拓展”,即纵向提升我国基础产业能力,突破 4G 仍受制约的射频功放、滤波器等核心器件的产业瓶颈环节;横向拓宽应用领域,如工业互联网、车联网等行业应用。

7 结束语

通过推动 TD-SCDMA 产业化,我国初步形成了基于本土企业的完整移动通信产业链。在 4G 阶段,我国实现了标准同步制定、设备同平台开发、网络性能相当和全球商用同步,TD-LTE 已发展成为全球两大 4G 主流标准之一,形成了具有国际竞争力的移动通信产业链,特别是我国企业在 TDD 技术、标准和产业上具有全球竞争力。我国已具备了从“3G 追赶、4G 同行”到“5G 引领”的基础。况且通过分析 5G 的整体需求与关键技术特点,我国拥有优势的 TDD 和多天线多流波束成形技术等将会在 5G 中发挥更大的作用。

我国针对 5G 研究成立了 IMT-2020(5G)推进组,前期已经完成了对 5G 的需求、概念、网络技术和无线技术的分析,且有多项成果输入 ITU 获得认可。相信在政府的指导下,通过我国企业和高校、研究所等在 5G 的技术突破、标准制定和样机开发与试验网方面的努力,有信心在“3G 追赶、4G 同行”的基础上,实现中国“5G 引领”的战略目标。



参考文献:

- [1] WiMAX Forum. White paper: WiMAX advanced to harmonize with TD-LTE in the 2.3, 2.5&3.5GHz bands opportunities & challenges for WiMAX2 [R/OL]. [2016-05-10]. <http://www.wimaxforum.com>.
- [2] THOMPSON J, GE X L, WU H C, et al. 5G wireless communication systems: prospects and challenges [guest editorial] [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52 (2): 62-64.
- [3] IMT-2020 (5G) Promotion Group. IMT-2020 [EB/OL]. [2016-05-10]. <http://www.IMT-2020.org.cn/>.
- [4] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 愿景与需求白皮书 [R]. 北京: IMT-2020, 2014.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper of 5G vision and demand[R]. Beijing: IMT-2020, 2014.
- [5] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 北京: IMT-2020, 2015.
IMT-2020(5G) Promotion Group. White paper of 5G concept[R]. Beijing: IMT-2020, 2015.
- [6] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 无线技术架构白皮书 [R]. 北京: IMT-2020, 2014.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper of 5G wireless technology architecture[R]. Beijing: IMT-2020, 2014.
- [7] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 网络技术架构白皮书 [R]. 北京: IMT-2020, 2015.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper of 5G network technology architecture[R]. Beijing: IMT-2020, 2015.
- [8] 大唐电信科技产业集团. 演进、融合与创新——5G 白皮书[R]. 北京: 大唐电信科技产业集团, 2013.
Datang Telecom Group. Evolution, convergence and innovation——5G white paper[R]. Beijing: Datan Telecom Group, 2013.
- [9] CHEN S Z. Adaptive beamforming in TDD-based mobile communication systems: state of the art and 5G research directions [J]. Accepted by IEEE Wireless Communications Magazine.
- [10] CHEN S Z. Pattern division multiple access (PDMA)-a novel non-orthogonal multiple access for 5G radio networks [J]. Accepted by IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [11] DAI X M, AI X M, CHEN S Z. Successive interference cancelation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications [C]//2014 IEEE International Conference on Communication System (ICCS), November 19-21, 2014, Macau, China. New Jersey: IEEE Press, 2014: 222-226.
- [12] IMT. IMT trend from ITU-R WP5D[EB/OL]. [2016-05-10]. <http://www.itu.org/>.
- [13] CHEN S Z, ZHAO J. The requirements, challenges and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 36-43.
- [14] WEBB W. Wireless communications: the future [M]. New York: Wiley, 2007.
- [15] CHEN S Z, QIAN F, HU B, et al. User-centric ultra-dense networks for 5G: challenges, methodologies and directions [J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2016, 23(2): 78-85.
- [16] Spectrum Efficiency Working Group. Federal communications commission spectrum policy task report [R/OL]. [2016-05-10]. http://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf.
- [17] YUAN G, GRAMMENOS R C, YANG Y, et al. Performance analysis of selective opportunistic spectrum access with traffic prediction [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1949-1959.
- [18] CHEN S Z, ZHAO J, AI M, et. al. Virtual RATs and a flexible and tailored radio access network evolving to 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 52-58.
- [19] 大唐电信科技产业集团. 建设安全可信的网络空间——5G 网络安全白皮书[R]. 北京: 大唐电信集团, 2015.
Datang Telecom Group. The construction of security and trusted cyberspace——5G network security white paper[R]. Beijing: Datan Telecom Group, 2015.
- [20] CHEN S Z. TD-LTE evolution and future 5G directions [C]// IEEE/CIC ICCS 2015, November 2-4, 2015, Shenzhen, China.
- [21] GTI. TDD+: bridge the gap from 4G to 5G[EB/OL]. [2016-05-10]. <http://www.gtigroup.org/e/DownSys/doaction.php?enews=DownSoft&classid=494&id=564&pathid=0&pass=afcf4c22b9897be54ad0c9ccfd5e0a71&p=1616>.

[作者简介]



陈山枝(1969-),男,博士,大唐电信科技产业集团副总裁,电信科学技术研究院副院长,无线移动通信国家重点实验室主任,教授级高级工程师、博士生导师,IEEE 高级会员,工业和信息化部通信科技委常务委员,中国电子学会会士,中国通信学会会士。曾任国家“863”计划专家组成员、国家科技重大专项三专家组成员等。同时担任《IEEE Network》《IEEE Internet of Things Journal》《通信学报》《电信科学》和《中国通信》(China Communications)的编委,IEEE Wireless Communications Magazine 和 IEEE Communications Magazine 的特邀编委。曾获 2015 年度国家技术发明奖二等奖、2012 年度国家科学技术进步一等奖、2001 年度国家科学技术进步二等奖、第九届光华工程科技奖和 2014 年度中国通信学会科学技术特等奖等荣誉。目前主要研究方向为网络体系构架、无线移动通信、物联网。