

Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering  
 www.jzus.zju.edu.cn; engineering.cae.cn; www.springerlink.com  
 ISSN 2095-9184 (print); ISSN 2095-9230 (online)  
 E-mail: jzus@zju.edu.cn



## 综述:

# 5G 综述及其在中国的进展\*

陈山枝<sup>†‡</sup>, 康绍莉

大唐电信科技产业集团/电信科学技术研究院有限公司 (CATT), 无线移动通信国家重点实验室, 中国北京市, 100191

<sup>†</sup>E-mail: chensz@datanggroup.cn

投稿 2018-1-26; 录用 2018-3-21; crosscheck 2018-3-23

**摘要:** 第五代移动通信技术 (5G) 自 2012 年始发展迅速, 已成为新一轮全球经济增长的驱动力。本文在以下几个方面全面介绍了 5G: 愿景和需求、关键技术、标准化、发展路标、频谱分配、技术试验、产业生态和 5G 主要贡献者。同时指出, 中国以“5G 引领”为目标, 作为 5G 技术和标准的主要贡献者, 积极推动着 5G 产业发展。最后, 基于 5G 最新进展, 给出了作者关于 5G 的再思考。

**关键词:** 5G; IMT-2020; 愿景和需求; 关键技术; 标准化; 技术试验

本文译自 Chen and Kang “A tutorial on 5G and the progress in China” (*Front Inform Technol Electron Eng*, 2018 19(3):309-321. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1800070>)

中图分类号: TN92

## 1 引言

受业务和技术驱动, 移动通信经历着十年一代的更新。第 1 代移动通信 (1G) 诞生于上世纪 80 年代, 以话音业务为主; 第 2 代移动通信 (2G) 诞生于上世纪 90 年代, 以话音和短信为主; 第 3 代移动通信 (3G) 诞生于本世纪初, 以话音、短信、多媒体为主; 2012 年世界无线电大会 (World Radio Conference 2012, WRC-12) 上, 国际电信联盟无线电部门 (International Telecommunication Union's radio department, ITU-R) 发布了第 4 代地面移动通信标准 (4G, 又称 IMT-Advanced), 以移动互联网业务为主; 自此, 第 5 代移动通信 (5G) 开始成为学术界和工业界的热点话题。主要国家、组织及企业都开始积极投入 5G 研究, 以

寻求新的经济增长点和发展机遇。2013 年, 多个国家相继成立了官方 5G 组织, 包括中国的 IMT-2020 (5G) 推进组、韩国的 5G Forum、欧洲的 5GIA、日本的 5GMF、美国的 5G Americas、以及后来成立的巴西 5G Brazil 等。为建立全球统一的 5G 标准、更好地推进 5G 产业发展, 这些 5G 官方组织逐步加强国际合作, 组织全球 5G 峰会, 探讨政策策略、频谱规划、技术创新、标准发展、技术试验、部署方式、产业生态及垂直行业应用、国际合作等系列议题。第 1 次全球 5G 峰会于 2016 年 5 月在北京成功举办, 随后以半年为周期相继举办于欧洲罗马、日本东京和韩国首尔。2018 年, 第 5 届全球 5G 峰会于 5 月在美国奥斯汀举行, 随后将于 11 月在巴西里约热内卢举行。在业界积极投入和快速推进下, 5G 得到了快速发展。2013 年, 相关组织及企业相继发布各种技术报告和白皮书, 对 5G 进行了总体展望。例如, 大唐电信集团发布的《5G 白皮书》, 较全面地分析了 5G 愿景、技术需求、关键技术及挑战、潜在频率及挑战、运营方式及挑战等系列问题。2014 年, ITU 发布了文件 IMT.vision (ITU-R, 2014), 用三大应用场景

<sup>‡</sup> 通讯作者

\* 本文得到以下项目的资助: 中国国家自然科学基金 (项目批准号: 61425012)

ORCID: Shan-zhi CHEN, <http://orcid.org/0000-0002-5409-8168>  
 © Zhejiang University and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

和八大技术指标要求来描述 5G 的愿景和需求。2015 年, 5G 关键技术开始收敛, 包括新型网络架构和多种无线关键技术。2016 年, 5G 领域更是发生了突破性事件, 其一为 3GPP 在 R14 正式启动了 5G 新空口 (5G NR) 研究, 并计划用 R15 和 R16 两个版本完成 5G NR 标准化工作; 其二为中国正式启动了 5G 技术试验, 计划分为工信部主导的技术研发试验和运营商主导的产品研发试验两个阶段, 而每个阶段又分为三个步骤。这些事件逐步推动 5G 走向商用。

为更好了解 5G, 本文给出 5G 概览, 包括愿景和要求、关键技术、标准化、频率管理、技术试验、路线图和产业生态。此外, 还将介绍 5G 在中国的进展, 体现中国对 5G 的贡献及在业界的领先地位。

## 2 5G 愿景和需求

与前几代移动通信不同, 5G 不仅有望服务于电信本身, 也有望服务于行业信息化和整个信息社会。中国 IMT-2020 (5G) 推进组发布的《5G 需求与愿景》白皮书 (IMT-2020(5G) Promotion Group, 2014) 中提到: 5G 将渗透到未来社会各个领域, 以用户为中心构建全方位的信息生态系统; 5G 将使信息突破时空限制, 提供极佳交互体验, 为用户带来身临其境的信息盛宴; 5G 将拉近万物的距离, 通过无缝融合方式, 便捷地实现人与万物的智能互联; 5G 将为用户提供光纤般的接入速率, “零”时延的使用体验, 千亿设备的连接能力, 超高流量密度、超高连接数密度和超高移动性等多场景的一致服务, 业务及用户感知的智能优化, 同时将为网络带来超百倍的能效提升和超百倍的比特成本降低, 最终实现“信息随心至, 万物触手及”的总体愿景。

中国向 ITU 提交了对 5G 需求与愿景的研究成果, 并最终得到了 ITU 的认可。ITU 对 5G 进行了三大场景八大技术指标的定义, 具体如图 1 所示。图 1 (a) 给出了面向 2020 年及以后的移动通信系统典型应用场景及其对应潜在业务类型, 包括增强移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB)、低功耗大连接 (massive machine type communications, mMTC)、低时延高可靠 (ultra-reliable low

latency communications, URLLC) 三大场景。图 1 (b) 给出了 5G 的八大关键技术指标。这些指标相对于 4G 能力提升显著, 具体如表 1 所示。此外, 每一类场景所对应的技术指标要求也不同, 其中峰值数据速率、连接密度和时延三个技术指标分别对应于 eMBB 场景、mMTC 场景和 URLLC 场景的最具挑战性指标。

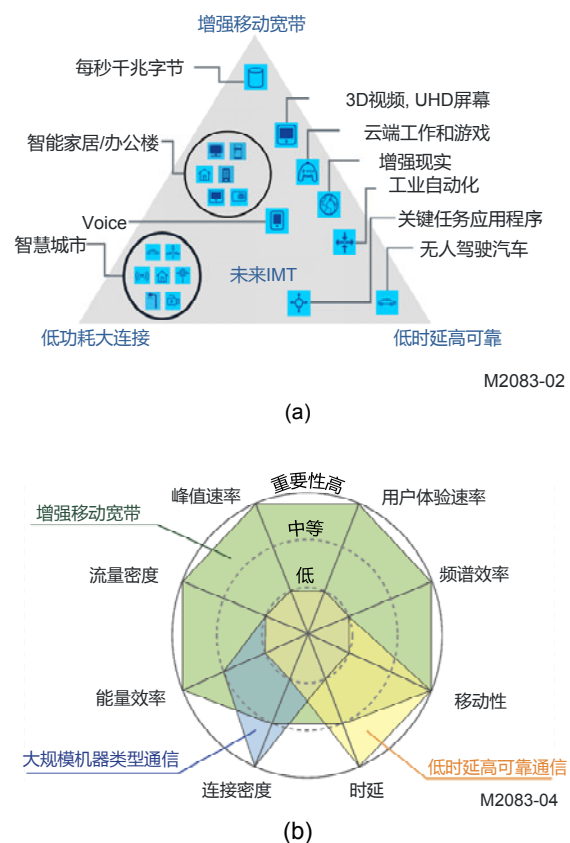


图 1 ITU 定义的 5G 需求: (a) IMT 面向 2020 及之后的应用场景; (b) 不同场景的关键能力要求 (ITU-R, 2015)

表 1 5G 相对于 4G 的能力提升

指标项	ITU 针对 5G 的定义	5G 相对于 4G 的提升倍数
流量密度	10 Tbps/km <sup>2</sup>	1000 倍
连接密度	1 million/km <sup>2</sup>	1000 倍
时延	1 ms (空口)	1/10 倍
峰值速率	[10/20] Gbps	>10 倍
用户体验速率	[0.1~1] Gbps	>10 倍
移动性	500 km/h	<5 倍
频谱效率	[2/3/5] 倍	≤5 倍
能量效率	100 倍 (网络)	100 倍

### 3 5G 关键技术

为满足 5G 技术指标要求,需要一系列关键技术的支持。从技术路线来看,演进和革命是业界共识的两条基本路线(Chen and Zhao, 2014; Chen et al., 2016a)。其中演进路线表示 4G LTE-Advanced 系统不断增强(例如在系统容量、频谱效率、用户体验速率、运营效率等方面),能够满足 5G 的大部分需求,这类研究在 3GPP 中被称为 LTE-A Pro; 革命路线表示定义 5G 的新空口,全面满足 5G 需求,这类研究在 3GPP 中被称为 5G NR。相较于传统 FDD 制式和 TDD 制式,在 LTE-A Pro 和 5G NR 中, FDD 和 TDD 将会更紧密地融合,尤其 TDD 制式,将发挥更重要的作用。对应于 5G 技术路线和融合技术制式的潜在关键技术包括大规模天线(massive multiple-input multiple-output, massive MIMO)、非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)、超密集组网(ultra dense networking, UDN)、先进编码调制、灵活的频谱接入等无线关键技术和新型网络架构及网络关键技术(Chen et al., 2015a)。

#### 3.1 无线关键技术

##### 3.1.1 大规模天线

MIMO 技术已经在 4G 系统中得到广泛应用。在 5G 传输速率和系统容量等方面的性能挑战中,天线数目的进一步增加仍将是 MIMO 技术继续演进的重要方向。根据概率统计学原理,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。这种情况下,用户间干扰趋于消失,而巨大的阵列增益能够有效提升每个用户的信噪比,从而在相同时频资源上支持更多用户传输(Marzetta, 2010; Larsson et al., 2014)。按部署形态,大规模天线可分为集中式和分布式两种。对于每种形态,都需要考虑参考信号设计、信道估计、信道状态反馈、多用户调度机制、接收算法等方面的研究。

尽管 FDD 和 TDD 都可以使用大规模天线技术,但 TDD 具有上下行信道互易性,减少了信道状态信息(channel state information, CSI)获取所需的大量开销,从而实现更高的频谱效率(Chen et al., 2016b)。如图 2 所示,在天线数相同的情况

下,无论在小区平均频谱效率上还是小区边缘频谱效率上, TDD 相对于 FDD 均能获得更大的性能提升,约 49%–137%。因此, TDD 制式是 5G 系统实现大规模天线技术的最佳选择。

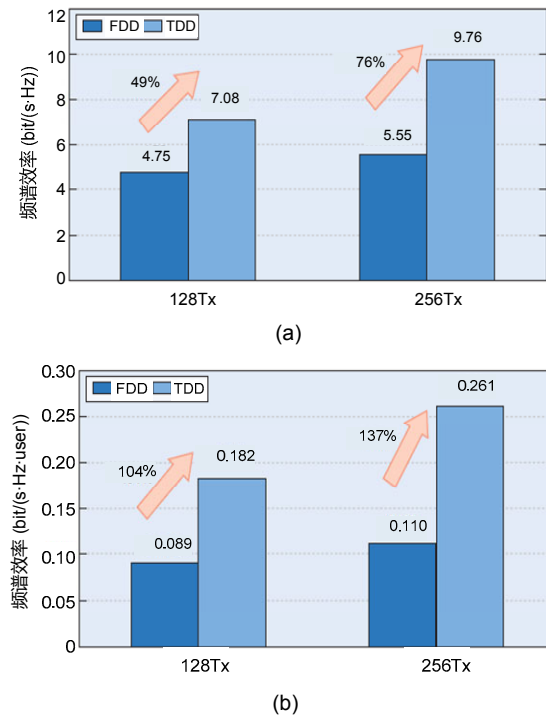


图 2 大规模天线在 FDD 和 TDD 制式上的性能比较: (a) 小区平均频谱效率; (b) 小区边缘频谱效率(Chen et al., 2016b)

##### 3.1.2 非正交多址接入

多址接入是以往移动通信系统更新换代的标志。1G 以频分多址(FDMA)为主, 2G 以时分多址(TDMA)为主, 3G 以码分多址(CDMA)为主, 4G 以正交频分复用多址(OFDMA)为主。面向 5G 大连接、低时延、高频谱效率的需求, 非正交多址接入技术应运而生。和正交多址相比, 非正交多址在相同时频资源单元内可以复用更多用户, 系统容量明显提升。但非正交多址因采用非线性接收机, 相对于正交多址具有更高计算复杂度。得益于集成电路发展和器件进步, 非线性接收机易于在基站或终端中实现, 使得非正交多址接入从理论研究走向实际应用, 成为 5G 中实现系统容量提升、用户连接数提升和时延降低的潜在技术(Dai et al., 2015; Ding et al., 2017; Cai et al., 2018; Chen et al., 2018)。

业界已经提出 10 余种非正交多址接入方案 (Takahashi, 2016), 包括 PDMA (Chen et al., 2017a)、SCMA (Nikopour and Baligh, 2013)、MUSA (Yuan et al., 2016)、RSMA (3GPP, 2016b)、IGMA (3GPP, 2016a)等。依据多用户复用方式的不同, 这些非正交多址技术方案可大致分为编码类型、交织类型、加扰类型, 目前, 3GPP R15 正在就这些技术展开热烈讨论。

### 3.1.3 超密集组网

通过更加“密集化”的无线网络基础设施部署, 超密集组网可获得更高的频率复用效率, 从而在局部热点区域实现成百上千倍的系统容量提升。如表 2 总结, 和传统蜂窝组网方式相比, 超密集组网在部署场景、接入点密度及类型、覆盖范围及方式、用户密度、回传方式、用户移动速度、数据速率要求、频谱带宽等多个方面存在着较大差异(Chen et al., 2016c)。超密集组网的典型应用场景包括办公室、密集住宅、体育场、大型集会、地铁等, 需要支持非常高的用户密度、业务流量和接入点 (AP) 密度(Ge et al., 2016)。

表 2 超密集网络与传统蜂窝网络的比较

参数	超密集网络	传统蜂窝网络
部署场景	室内、热点	广域覆盖
接入点密度	类似于用户密度	远低于用户密度
接入点类型	小蜂窝、小小蜂窝、接力站	宏蜂窝、微蜂窝
覆盖范围	大约 10 米	几百米或更大
覆盖方式	异构、不规则	单层、规则结构
用户密度	高	低/中等
回传	理想或非理想, 有线或无线	理想, 有线
用户移动速度	低速	高速
数据速率要求	高速率	低速率/中等速率
频谱及带宽	高频、大带宽	低频、小带宽

随着小区部署密度的增加, 超密集组网面临诸多技术挑战, 如干扰、移动性、站址、传输资源以及部署成本等, 因此需要对以用户为中心的网络架构、干扰管理和抑制、小区虚拟化、接入和回传联合设计等方面内容重点研究(Chen et al., 2016c)。

### 3.1.4 先进编码调制

5G 既有对高速率的业务需求, 也有对低速率

小包业务和低时延高可靠的业务需求。因此, 除了传统的二进制 Turbo 码和正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 之外, 5G 还需要支持先进的编码和调制方法以实现丰富的业务类型。对于高数据速率业务, 低密度奇偶校验码 (low density parity check, LDPC) (Zhu et al., 2016)、新型星座映射方式和超奈奎斯特 (faster-than-Nyquist, FTN) 调制(Qi et al., 2017)等可用于进一步提高链路频谱效率; 对于低数据速率小包业务, 极化码(Tian et al., 2016)和低码率卷积码可以在短码长和低信噪比条件下接近香农容量界; 对于低时延业务, 需要选择编译码处理时延较低的编码方式; 对于高可靠性业务, 需要消除译码算法的“错误平坦”效应。

目前 3GPP 已经明确了 5G 增强移动宽带场景的信道编码方案, 其中数据信道采用 LDPC 编码, 控制信道采用极化码。

### 3.1.5 灵活频谱接入

传统移动通信往往工作在 3 GHz 以下低频段。然而, 面对紧张的频率资源以及高涨的频率需求之间的矛盾, 5G 将同时工作在 6 GHz 以下的低频段和 6 GHz 以上 100 GHz 以下的高频段。其中, 6 GHz 以下的低频段是 5G 用于无缝覆盖的核心频段, 而 6 GHz 以上的高频段将作为 5G 在热点地区实现高数据速率的有效补充。为了充分利用不同频率的优势, 5G 需要支持高低频融合的组网方式, 以同时满足无缝覆盖、超高数据速率和超高容量的要求。

考虑到高频段与传统低频段在传播特性上存在较大差异, 对 5G 频谱接入的研究主要集中在高频移动通信关键技术, 包括信道测量和建模、新型空口设计、组网技术和射频器件等。

此外, 5G 还引入了创新的灵活频谱共享方式, 来进一步提升频谱资源利用率。常用共享方式包括运营商内部多技术制式频率共享、运营商之间频率共享、运营商作为次用户接入非 IMT 系统、运营商使用免授权频段等。

### 3.1.6 灵活空口设计

为实现统一的空口结构, 5G 可在系统设计上针对不同场景灵活配置帧结构和关键参数, 如带宽、子载波间隔、循环前缀 (cyclic prefix, CP)、

传输时间间隔 (transmission time interval, TTI)、上下行时隙配比等。此外,参考信号和控制信道也可灵活配置,以支持关键技术应用。

除了传统的 FDD 和 TDD 模式,5G 还支持灵活的双工模式。一方面,5G 可以根据频段选择 FDD 或 TDD,例如,FDD 通常工作在低频段,但 TDD 在低频段和高频段都可使用;另一方面,5G 可灵活分配上下行时隙比例,更好适应非均匀的、动态的业务分发。此外,5G 还将支持全双工技术,在相同频率资源上同时进行发送和接收,进一步提升频谱资源利用率。

除了 4G 已支持的 OFDM 和 DFT-S-OFDM 波形外,5G 还将支持其他基于优化滤波的新波形,例如 FBMC (Chen et al., 2013)、GFDM (Wunder et al., 2014)、F-OFDM (Wunder et al., 2014)、UFMC (Vakilian et al., 2013)等。由于其带外泄漏非常低,这些波形可以有效利用碎片频谱从而提高频谱利用率,并且能够较好地与已有的 OFDM 波形共存。

### 3.1.7 车联网

车联网统称为 V2X (Vehicle-to-everything),具体包括车与车 (vehicle-to-vehicle, V2V)、车与人 (vehicle-to-pedestrian, V2P)、车与基础设施 (vehicle-to-infrastructure, V2I)、车与网络 (vehicle-to-network, V2N) 之间的通信。车联网提高了道路的安全性,提升了交通效率和信息服务的可用性(Chen et al., 2017b)。

受益于长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 系统的全球部署和快速商业化,基于 LTE 的 V2X 系统 (称为 LTE-V 或 LTE V2X)(Chen et al., 2016d) 已在 3GPP 完成标准化。LTE-V 提供了两种互补的通信模式,其一为集中式架构的 LTE-V-Cell,其二为分布式架构的 LTE-V-Direct。为满足 V2X 通信的性能要求,LTE-V 采用的关键技术包括解调参考信号 (demodulation reference signal, DMRS) 结构增强、全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 和 eNB 协调的同步方式、频分复用 (frequency division multiplexing, FDM) 与时分复用 (time division multiplexing, TDM) 结合的车辆间资源复用方式、半持续调度 (semi-persistent scheduling, SPS)、基于感知的资源分配等。

目前,3GPP 已开始 NR V2X 研究。

## 3.2 新型网络架构和关键技术

与前几代以多址接入为技术变革标志的移动通信系统相比,5G 技术变革已从无线侧扩展到网络侧。5G 业务需求和以软件定义网络 (software defined network, SDN) /网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 等为代表的新型技术共同驱动 5G 网络架构创新,从而支持多样化无线接入场景,满足端到端的业务体验需求,实现灵活网络部署和高效网络运营,最终与无线空口技术共同推进 5G 发展。因此,5G 网络需要在基础设施平台和网络架构方面采取技术创新和协同发展,完成整个网络变革(Agyapong et al., 2014; IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015a)。

目前的电信基础设施平台基于专用硬件实现,5G 网络通过引入 SDN 和虚拟化技术,可实现基于通用硬件的新型基础设施平台的建设,从而解决现有基础设施平台成本高、资源配置能力不强、业务上线周期长等问题。5G 新型网络架构包含接入、控制和转发 3 个功能平面,其中接入平面通过用户和业务的感知与处理技术,按需定义接入网拓扑和协议栈,提供定制化部署和服务,保证业务性能;控制平面功能包括控制逻辑、按需编排和网络能力开放;转发平面将网关中的会话控制功能分离,使得网关位置下沉,实现分布式部署。基于这种新型网络架构,涉及到的关键技术包括 SDN、NFV、移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC)、网络切片、控制与转发分离、控制功能重构、新型连接和移动性管理等(Wang CX et al., 2014; Chen et al., 2015b; Wang HC et al., 2015, 2017)。

MEC 在靠近移动用户的位置上提供信息技术服务环境和云计算能力,并将内容分发推动到靠近用户侧 (如基站),使应用、服务和内容部署在高度分布的环境中,从而更好支持 5G 中低时延和高带宽的业务需求。作为一项新兴技术,MEC 面临诸多挑战,如运营商、设备商、内容提供商、应用开发商之间的开放与合作、新业务的安全机制、移动性、计费方式等。

网络切片是按需组网的一种实现方式,它利用虚拟化技术将 5G 网络物理基础设施资源根据场景需求虚拟化为多个相互独立的、平行的虚拟网络切片,每个网络切片按照业务场景的需要和话务模型进行网络功能的定制剪裁和相应网络资



源的编排管理。如图 3 所示,网络切片是端到端 (end-to-end, E2E) 的,依据特定的业务要求,一个网络切片可以视为实例化的 5G 核心网和接入网架构。在一个网络切片内,运营商可以进一步对虚拟资源进行灵活的分割,按需创建子网络。

控制功能重构是通过把控制面功能拆分成独立的功能逻辑模块,再根据不同应用场景组合,以形成不同网络控制面,从而解决现有网络的功能冗余、网络接口众多以及标准化工作困难问题,并且通过组合不同的控制面功能提供差异化网络特征,满足 5G 丰富的业务类型对于网络多样性的需求。

## 4 5G 标准和技术试验

### 4.1 5G 标准化

全球多个组织都在积极推进 5G 标准化工作,例如 ITU、3GPP、NGMN 等。

ITU: ITU 是 5G 标准最终发布者,它自 2010 年就开始 5G 准备工作,探讨 5G 业务、频率、需求、技术等,并于 2014 年发布了反映 5G 愿景与需求的文件 IMT.vision (ITU-R, 2015)和反映 5G 潜在关键技术的文件 IMT.trend (ITU-R, 2014),于 2015 年确定了 5G 的正式命名: IMT-2020。之后,ITU 开始为 5G 技术征集和技术评估做准备,目前已完成 5G 技术评估需求描述,正在广泛征集 5G 技术提案,并已启动了自评估和第三方评估工作。预计 ITU 将于 2020 年在 ITU-R WP5D 第 36 次会议上正式发布满足 5G 需求的技术提案作为正式 5G 标准。

3GPP: 自 R13 开始,3GPP 便启动了一部分与 5G 相关的研究项目 (study item, SI),例如高频信道建模、5G 需求等。随后,在 R14 阶段,3GPP 正式启动了 5G 新空口研究项目 (5G NR SI),并计划自 R15 开始 5G 新空口工作项目 (5G NR WI),利用 R15 形成 5G 初始版本标准,利用 R16 形成 5G 完整标准版本。在 3GPP 针对 R15 的具体讨论中,5G 初始标准版本又被细分成非独立组网 (non-standalone, NSA) 和独立组网 (standalone, SA) 两个阶段。为满足部分运营商的 4G&5G 联合部署计划,5G NSA 版本提前在 2017 年底冻结,它提供了一个过渡性解决方案,利用现有 4G LTE 网络进行 5G NR 和 LTE 双连接部署。由于没有独立信令平面,5G NSA 主要用于提升热点地区的容量和速率。与 4G 相比,5G NR 带来很多变化,如单载波带宽高达 400 MHz、可扩展的子载波间隔 ( $n \times 2^N$ )、灵活的帧结构以及可变参数集、LDPC 和极化码、大规模天线、毫米波、CU-DU 分离等。目前 5G NR 主要以 eMBB 场景为主,后续需要考虑更多增强功能,尤其是针对 URLLC 场景的设计。蜂窝 V2X (C-V2X) 是 URLLC 场景的一个典型代表,3GPP 对其标准化过程进行了规划,计划用 3 个阶段完成 C-V2X 的整体标准化工作,具体如图 4 所示。目前已完成的 LTE V2X 被认为是 C-V2X 的第 1 阶段。R15 在进行的工作被认为是 C-V2X 的第 2 阶段,具体包括 LTE eV2X 工作项目和 V2X 评估研究项目。R16 以及后续版本被认为是 C-V2X 的第 3 阶段,潜在工作包括 NR V2X 及其增强。LTE V2X 和 NR V2X 将会长期共存,联合满足 3GPP SA1 对 C-V2X 需求所定义的 25 个用例。其中 LTE V2X 满足一些基本安全业务,而

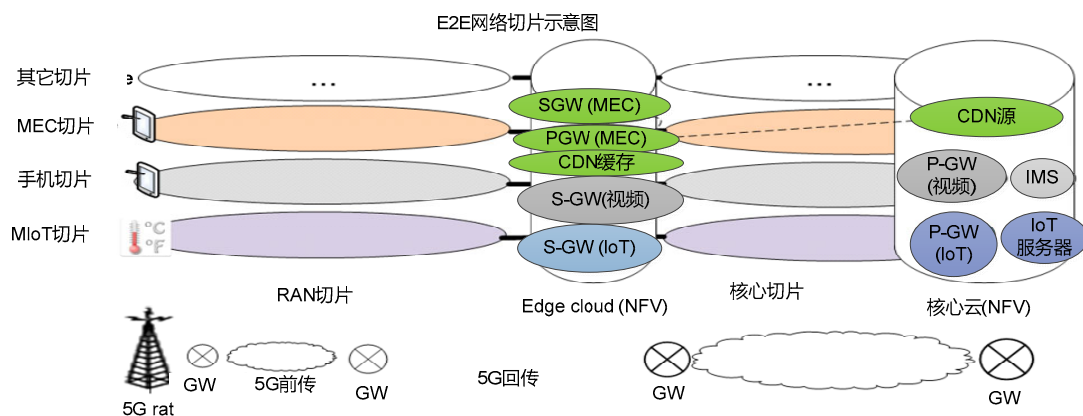


图 3 网络切片示意图

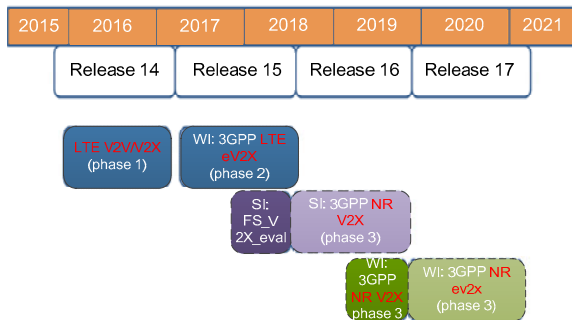


图 4 3GPP 关于 C-V2X 的推进计划

NR V2X 将满足自动驾驶相关的一些更高级业务。

5G SA 版本于 2018 年 6 月冻结，由此形成同时支持独立和非独立组网的统一 5G NR 初始标准版本。因该版本同时满足 eMBB 和 URLLC 场景，它为建立全球统一标准的 5G 生态系统打下了良好基础。为满足 ITU 所定义的三大场景的最终标准版本，3GPP 在 R16 会针对 5G NR 进行进一步增强，目前在探讨的立项建议有 MIMO 增强、非授权使用、中继、非正交多址、C-V2X、定位增强、终端节能、工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIoT)、大数据收集与利用等。

除了 ITU 和 3GPP，IEEE、NGMN、GSMA、GTI 等组织也一直在进行 5G 标准化工作探讨，并发布了相关白皮书(NGMN Alliance, 2015)。

## 4.2 5G 频谱管理

在前文关键技术分析中提到：5G 将同时工作在 6 GHz 以下的低频段和 6 GHz 以上 100 GHz 以下的高频段，以满足流量和数据速率相关的需求。对于低频段，ITU 早期评估表明，面向 2020 年 IMT 系统的总频谱需求为 1340–1960 MHz。除已分配或已确定的频谱，现存频谱缺口高达 1 GHz。而为满足 20 Gbps 峰值速率并让 5G 广泛应用于各行业，高频段频率缺口高达 10 GHz 以上。对于中国，按 IMT-2020 (5G) 推进组预测，WRC-15 已分配和确定的频率为 681 MHz，还需要低频段频率 808–1078 MHz，高频段频率 14–19 GHz。

继 ITU 的 WRC-15 进行 6 GHz 以下低频段频率分配后，WRC-19 开启了多个议题，以分配高频段频率。各个国家和组织都在积极进行 5G 频率需求和可行性分析，推动各自的频率分配策略以及区域间的频率协同与合作。表 3 给出了主要国家和组织针对自身 5G 频率划分的一些建议。

表 3 主要国家或组织关于 5G 的建议频段

国家或组织	低频段	高频段
欧盟	L band, 3.4–3.8 GHz	24.25–27.5 GHz, 31.8–33.4 GHz, 40.5–43.5 GHz
美国	UHF band	27.5–28.35 GHz, 37–40 GHz, 66–71 GHz
日本	3.6–3.8 GHz, 4.4–4.9 GHz	27.5–29.5 GHz
韩国	3.4–3.7 GHz	26.5–29.5 GHz
中国	3.3–3.6 GHz, 4.8–5.0 GHz	24.25–27.5 GHz, 37–42.5 GHz

## 4.3 5G 技术试验

对于移动通信系统，技术试验通常发生在标准形成之后，然而，受业界 5G 提速推动，5G 技术试验与 5G 标准化同期进行，以期将试验进展用于指导标准输入。表 4 给出了主要国家和组织针对 5G 的技术试验和商用计划。可以看出，各国都在积极组织运营商和设备商从事 5G 技术试验，争取早日实现 5G 商用。中国于 2016 年在业界率先发布了 5G 技术试验计划，并且为 5G 规划了相关频率以推进技术试验，此外，还开放了多个城市作为 C-V2X 试点区域，以加速 LTE V2X 应用推广。

表 4 主要国家或组织的 5G 试验和商用计划

国家/组织	5G 试验和商用计划
欧盟	通过 5G PPP 重大项目，投入 14 亿欧元研发资金 计划在 2018 年开展 5G 规模试验，验证 5G 技术标准
美国	运营商 Verizon 成立 5G 技术论坛，于 2016 年中发布 5G 标准 已发布 5G 频率，并计划在未来七年内，斥资 4 亿美元，在美国的四座城市中建设试验性的 5G 网络
日本	通过运营商 NTT DoCoMo 组织全球主要制造企业开展 5G 技术试验 计划于 2020 年夏季奥运会前提供正式 5G 商用服务
韩国	于 2017 年发布 5G 国家战略 计划于 2018 年冬奥会开展 5G 预商用试验，为奥运场馆提供 5G 业务体验
中国	于 2016 年发布 5G 技术试验计划 计划于 2018 年开始进行运营商组网和预商用试验，2020 年实现商用

#### 4.4 5G 路线图

图5从标准和产业推进层面给出了5G路线图规划。从标准来看,5G NSA标准已在2017年底完成,5G SA标准已于2018年6月完成,而包含所有场景的完整5G标准预计在2019年底完成,最终标准预计在2020年发布。从产业来看,2017年业界已进行5G关键技术试验和技术方案试验,正于2018年进行5G系统验证和产品研发试验,5G预商用网络也正开始建设,预计2020年5G将正式商用。

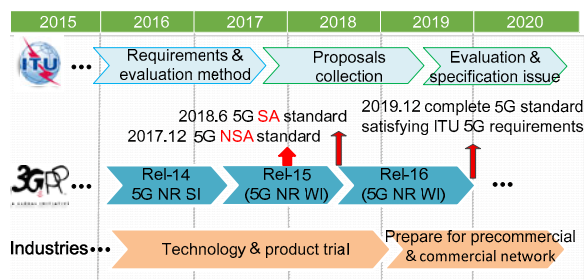


图5 5G路线图

#### 5 5G 生态及 IC 机会与挑战

目前5G正处于标准形成和产业推进的关键时期,各国都很重视5G发展,将5G视作国家数字化战略中的优先发展领域,加强产业布局,以期利用5G形成新的竞争形势。如图6所示,5G产业生态不仅包括传统移动通信本身,而且还带来集成电路(integrated circuits, IC)、信息安全及各垂直行业应用。5G将与云计算、大数据、人工智能、虚拟现实等技术结合,实现在机器人、无人机、自动驾驶等创新应用,提升现有工业化水平,跨界融合,创造新行业和产业形态,激发信息革命,并将数字经济构建打造成可与水电供应相提并论的基础设施。特别需要指出的是,得益于其满足超高可靠和超低时延能力,5G将促进车联网、无人机、移动医疗和工业互联网等垂直行业应用。

基于这一新的产业生态,一个国家的数字经济将会上升到一个新的水平。例如,中国IMT-2020(5G)推进组在《5G经济社会影响白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2017)中指出:作为通用技术,5G将全面构筑经济社会数字化转型

的关键基础设施,从线上到线下、从消费到生产、从平台到生态,推动我国数字经济发展迈上新台阶;2030年,在直接贡献方面,5G将带动的总产出、经济增加值、就业机会分别为6.3万亿元、2.9万亿元和800万个;在间接贡献方面,5G将带动的总产出、经济增加值、就业机会分别为10.6万亿元、3.6万亿元和1150万个。

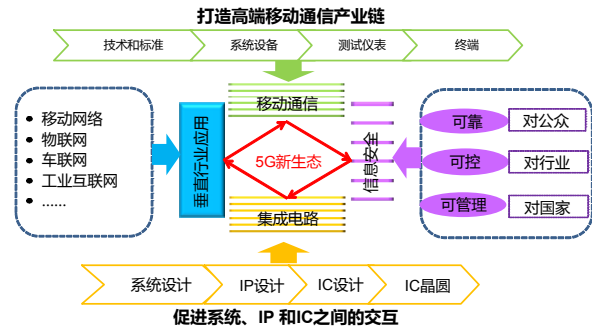


图6 5G产业生态部署示意图

集成电路是5G产业生态的关键环节。随着移动通信产业的快速发展,智能手机已经超越个人电脑,成为了全球半导体业务最大的应用市场。由于eMBB、mMTC和URLLC这三种典型场景将对应不同的终端和基站类型,因此5G制造商将为集成电路产业带来相对4G数倍的市场空间和机会。

适用于不同场景的终端需要不同类型的芯片,即具有不同的技术要求和路线图。例如,用于eMBB场景的芯片将支持智能手机的高性能需求,尤其是支持虚拟现实(virtual reality, VR)应用,但目前很少有公司可以提供功耗低于1瓦但超过10个TOPS(Tera Operations Per Second)的灵活计算;用于URLLC场景的芯片需要支持超低时延和超高可靠性的需求,还需具有良好的容错性和安全性及相对较长的生命周期,其中较低延迟意味着较高性能要求,如基带调制解调器时延从10 ms降低到1 ms意味着其计算性能的要求将为原来的10倍;对用于mMTC场景的芯片,价格低、功耗低和电池寿命长是必不可少的要求,如果某芯片供应商提供的mMTC芯片不能同时满足数量巨大、价格低廉以及其他要求,那么该芯片将会被淘汰。

此外,当载波频率高于20 GHz、带宽高达1 GHz时,还将面临来自射频收发器(包括IC和



无源组件)以及混合电路(ADC和DAC)的挑战,例如芯片价格和功耗控制、载波频率超过40 GHz时超宽带射频收发器的噪声和抖动控制等。

总之,5G将要满足高数据速率、高频率、高带宽、低时延、高可靠性、超高连接数和低功耗等要求,虽然不是在同一条件下达到,但仍给集成电路产业带来全新挑战:其一,eMBB芯片推向市场时将面临巨大初始投资成本,却只有较低出货量;其二,mMTC芯片需要针对各个垂直行业进行定制和流片;其三,URLLC芯片既需要高可靠性和安全性,又需要超低运算时延和较低价格,以满足工业互联网和车联网等场景。

## 6 中国的5G进展

中国非常重视5G发展。为推进5G研发,2013年2月,经工信部、科技部和发改委等三大部委联合发起,IMT-2020(5G)推进组正式成立。它是中国从事5G的官方推进组织,负责从需求和技术研究、频率、标准、技术试验、产业布局、项目策划、国际合作等多个方面推进5G发展。此外,未来移动通信论坛(Future Forum)也成立了5G特别兴趣工作组(5G SIG),从事5G新技术研究,并每年发布一些技术白皮书。另外,中国国内的标准化组织——中国通信标准化协会(China Communication Standard Association, CCSA)也已启动5G标准制定的立项工作,并规划了一系列5G标准文件。此外,垂直行业相关的一些产业联盟,如工业互联网产业联盟(Alliance of Industrial Internet, AII)、车联网产业技术创新战略联盟(Internet of Vehicles Alliance, IOVA)等,都给予了5G很大的关注和浓厚的兴趣。

IMT-2020(5G)推进组每年举办一次5G峰会,展示5G进展。例如,2014年,推进组以“5G目标及能力”为主题,发布了《5G愿景和需求白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2014); 2015年,又以“5G系统架构和关键技术”为主题,发布了《5G概念白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015)、《5G无线技术架构白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015b)、《5G网络技术架构白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015a); 2016年,联合全球各大5G政府组织举

办了第1届全球5G峰会,以“构建5G技术生态”为主题,发布了《5G网络架构设计白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2016); 2017年,以“5G标准与产业生态”为主题,进一步发布了《5G经济社会影响白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2017)。此外,IMT-2020(5G)推进组还于2016年初成立了5G试验工作组,并发布了5G技术试验计划;于2017年成立了C-V2X工作组,并推动了“5+2”城市的LTE V2X示范基地建设;于2018年初将原需求工作组改名为应用工作组,旨在推动5G在垂直行业的广泛应用。在国家科技重大专项和发改委的资助下,中国推出了五个“5”计划(5亿人民币资金投入,用于5G在5个城市的试验,每个城市50个基站,全网至少500个终端用户)。目前中国移动、中国电信、中国联通三大运营商正在多个城市积极进行5G试验网络建设和规模组网试验,推进5G的预商用和正式商用。

### 6.1 中国对5G标准的贡献

IMT-2020(5G)推进组对5G标准推进做出重要贡献。从参与ITU工作来看,ITU最终对5G的命名“IMT-2020”源于中国的提议;ITU针对5G愿景和需求的三大场景八大技术指标的定义也来自中国的输出,中国在《5G愿景与需求白皮书》(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2014)中提出了“5G之花”,用6个花瓣(反应包括流量密度、连接密度、峰值速率、用户体验速率、移动性、时延在内的6个方面的性能指标要求)和3片绿叶(反应包括频谱效率、能量效率、成本效率在内的3个方面的效率指标要求)反应了5G的技术需求,此外还为5G定义了4个典型场景(连续广域覆盖、室内热点覆盖、低时延高可靠、低功耗大连接),这些成果与ITU对5G的最终定义基本一致。ITU发布的关于关键技术的文件IMT.trend(ITU-R, 2014),包括中国在关键技术白皮书(IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015a, 2015b)中建议的大部分技术。目前,中国代表来自大唐的彭莹女士在ITU担任5G技术评估组主席,正带领业界进行5G技术评估工作。

在3GPP,中国企业在5G NR标准的推进中发挥了非常积极的作用,特别是在大规模天线(massive MIMO)、非正交多址接入(NOMA)、

超密集组网 (UDN)、V2X、帧结构与参数集、CU-DU 架构、服务网络架构 (service based network architecture, SBA) 等重要特性方面。例如, 大唐电信集团一直是 MIMO 方向的联合报告人, 并于 2016 年推出全球首个最大规模的 256 元 (128 通道) 大规模天线系统, 实现了 4 Gbps 小区峰值速率; 大唐、华为和中兴都提出具体 NOMA 技术方案 (PDMA/SCMA/MUSA), 有望成为 5G 典型场景提升容量、提升连接数、降低时延的重要技术方案, 且中兴和大唐是 R15 NOMA SI 的联合报告人; 华为和其他中国公司联合, 成功推动 Polar 码成为 5G NR 控制信道的编码方案; 中国移动和其他中国公司联合, 牵头制定了 5G 需求, 并将面向服务的网络架构推入了 5G 核心网的控制平面架构; 此外, 大唐最早提出基于 LTE-V 的车联网技术, 主导 C-V2X 标准制定, 大唐、华为等中国公司在上海、重庆、北京等示范区域在推广 LTE V2X 技术, 并与汽车行业进行了联合验证。

在 3GPP, 中国公司牵头的立项项目、输出的文稿提案及研究报告和标准文件占据三分之一及以上。

## 6.2 中国在 5G 技术试验上的贡献

从 3G TD-SCDMA 到 4G TD-LTE 和 5G, 中国企业是全球移动通信领域的重要成员, 其影响力日益提升。中国高校、研究机构和企业之间建立了成熟产学研合作和沟通机制, 促进移动通信从技术到产业的发展。如图 7 所示, 这种合作机制下的技术试验通常为时 5 年以上, 涵盖技术研发试验和产品研发试验两个阶段, 而每个阶段又细分为 3 个步骤。在工信部主导下, 技术研发试验阶段包括关键技术验证、技术方案验证和系统方案验证; 在运营商主导下, 产品研发试验包括小规模组网验证、大规模组网验证和预商用验证。

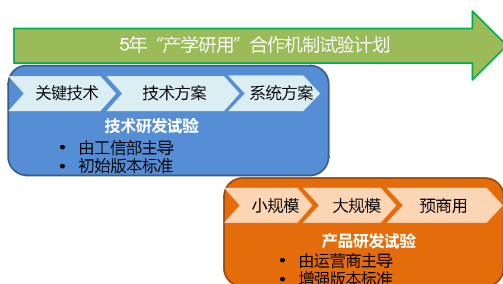


图 7 中国针对移动通信的产学研合作推进机制

随着 5G 到来, 它也将遵循产业规律和已形成的协作机制。由此, IMT-2020 (5G) 推进组针对 5G 测试制定了 2016–2020 年的 5 年计划。5G 测试的目标是推动 5G 关键技术和技术解决方案的研发, 推动全球统一 5G 标准的形成, 加速 5G 产品开发, 并打造完整的 5G 生态产业链。为支持 5G 技术研发, 国家“863”高科技计划进行了两期项目资助, 共涉及几十个 5G 课题。此外, 国家科技重大专项 (专项三) 在过去几年针对无线技术、网络与业务、关键设备/模块/平台的项目资助中, 5G 相关项目占据一半以上。这些项目较好地促进了 5G 基站、终端、测试仪表、芯片和网络等原型设备开发, 以跟进中国 5G 试验时间表。

截至 2017 年底, IMT-2020 (5G) 推进组已经完成了工信部组织的 5G 技术研发试验前两个步骤, 主要集中在 6 GHz 以下频段和 eMBB 场景, 也包括 mMTC 和 URLLC 场景部分验证。在 2016 年进行的第一个步骤关键技术验证中, 总共有 10 项关键技术进行了验证, 包括大规模天线、非正交多址接入、超密集组网、毫米波、新型编码、新波形、控制转发分离、控制功能重构、网络切片、边缘计算。在 2017 年进行的第 2 个步骤技术方案验证中, 依据 ITU 对于场景的要求, 总共考虑了增强移动宽带、热点高容量 (低频)、热点高容量 (高频)、高低频融合组网、低时延高可靠、低功耗大连接、混合组网这 7 个场景。这里给出一些令人振奋的测试结果: 在 6 GHz 以下低频段的 200 MHz 带宽, eMBB 场景的小区峰值数据速率超过了 10 Gbps; 在热点区域, 流量密度可远远高于 ITU 定义的指标 10 Mbps/m<sup>2</sup> (例如大唐达到 61 Mbps/m<sup>2</sup>); URLLC 场景的单向空中接口时延小于 0.5 ms; mMTC 场景下, PDMA 等非正交多址接入技术比 OFDMA 提升 6 倍的接入能力。在这些试验中, 不仅有中国企业参加, 国外运营商和设备商也参与其中, 具体包括中国移动、NTT Docomo、中国电信、中国联通、华为、Ericsson、中兴、大唐、Nokia、Samsung、展讯、Qualcomm、Intel、MTK、R&S、Keysight、大唐联仪、星河亮点, 等。

2018 年 1 月, 中国启动了技术研发试验阶段的第 3 步: 系统方案验证, 该试验预计可于 2018 年底前全部完成, 所有厂商将按照 3GPP 的 5G NR NSA 和 SA 版本分别进行验证。此外, 产品研发

试验阶段也自 2018 年开始逐步展开, 目前为止已规划了总计 12 个城市, 每个城市的网络规模达到 100 个基站以上, 对产品、网络、业务和用户体验进行测试。随着规模组网验证的深入, 预计 2019 年 5G 将会在中国开始商用, 2020 年实现正式商用。

## 7 5G 的再思考

基于 5G 在前期关键技术、标准推进和技术试验等方面的成果和经验, 这里, 作者针对 5G 未来发展进行了重新思考。从 4 个方面总结如下:

### 1. 5G 是万物智联的一代

1G 到 4G 主要专注于人与人之间的移动通信, 而 5G 远远超出人们预见, 不仅针对人, 还涉及物理实体和网络物理系统 (cyber physical systems, CPS)。5G 将是一个万物智能互联的时代, 它具有 3 方面主要新特点, 如大数据、海量连接和场景体验。信息社会将以数据和连接为标志, 这意味着 5G 即将到来。

### 2. 5G 是软件定义和 IT 化的时代

作为新一代移动通信, 5G 将以通信技术 (communication technology, CT) 和信息技术 (information technology, IT) 的深度融合为特征, 并且可以软件定义, 具有智能化和平台化特点。

5G 将由包括 SDN、NFV 和可软件定义的空口来进行软件定义, 从而使 5G 网络和空口都可编程化, 并将使得 5G 网络易于采用通用硬件平台和通用软件平台来实现, 并可引入开源软件, 如业界成立 ORAN (Open Radio Access Network) 联盟。

### 3. 5G 是更接近用户的云时代

5G 呈现云化趋势的关键特征有 C-RAN、MEC 和雾计算 (fog computing)。

C-RAN 意味着将多个基带单元 (baseband unit, BBU) 集成在一起, 形成一个基带池, 服务数百个射频无线单元 (radio remote unit, RRU)。这种情况下, 传统基带处理将被 RAN 侧超低时延虚拟计算资源云所替代。

MEC 意味着 5G 网络边缘将提供 IT 服务, 因此计算和存储服务将更接近终端用户, 提高响应时间, 提升用户体验。MEC 将在移动分布式环境中部署应用程序、业务和内容。通过这种本地化

部署方式, 网络可以释放大量无线带宽资源, 使得提供各种业务的梦想成为可能。

通过引入雾计算, 5G 终端也可以云化。与 IC 技术发展同步, 终端中的资源 (包括计算、存储器和传感器等) 将得到显著增强, 并且这些资源可以共享, 特别是在智能网联汽车和社交网络中应用。

### 4. 5G 是蜂窝结构变革的一代

从 1G 到 4G, 移动通信系统都是基于传统蜂窝结构, 由一个个六边形的蜂窝组成, 是干扰受限的系统。5G 引入了超密集组网, 采用更多接入点 (如本地小基站、无线中继站、微基站和分布式天线系统等), 网络结构不再规则, 安装和部署也不再是六边形规律, 覆盖范围也存在重叠, 形成异构分层网络结构。

在 5G 网络中, 传统常规蜂窝网络结构将不再存在, 作者提出了“去蜂窝”概念 (Chen et al., 2016c), 从而引发网络结构变革。

## 8 总结和未来展望

作为预期中的新一轮经济增长点, 5G 得到了各国政府和组织广泛关注和积极投入, 发展非常迅速。从愿景看, 5G 将给人类日常生活乃至整个社会带来前所未有的变化, 实现真正的万物互联和智联; 从需求看, 5G 需要满足 eMBB/mMTC/URLLC 三大应用场景和八大关键技术指标要求; 从关键技术看, 5G 将实现新型网络架构和系列关键技术创新。目前, 5G 第一阶段标准制定已完成, 包括非独立组网版本 (5G NSA) 和独立组网版本 (5G SA), 支持 eMBB 和 URLLC 场景; 5G 第二阶段标准制定即将启动。5G 技术研发试验已经完成关键技术验证和技术方案验证, 正在进行系统方案验证和产品研发试验, 但因已有技术研发试验以 eMBB 场景为主, 后续还需进一步加强 mMTC 和 URLLC 场景试验。5G 产业生态环境正在构建, 后续需要进一步加强与垂直行业合作, 共同推进 5G 广泛应用。5G 预商用网络正在建设中, 预期将在 2020 年左右正式开启 5G 大规模商用。

随着 5G 快速发展, 对于后 5G (B5G) 的研究将逐步开展。目前, 学术界和工业界在探讨一些热点新兴技术, 如人工智能和大数据应用在 5G

实现智能 5G、空天地一体化通信、太赫兹通信、通信感知联合处理等。可以预见，新一代移动通信即将开启并将走上新征程。

## 致谢

作者感谢大唐电信集团蔡月民博士和北京邮电大学胡博教授协助准备相关材料，感谢北京理工大学刘大可教授的宝贵意见和在集成电路挑战部分的贡献。

## 参考文献

- 3GPP, 2016a. Non-orthogonal multiple access candidate for NR. R1-163992. Samsung.
- 3GPP, 2016b. RSMA. R1-164688. Qualcomm Incorporated.
- Agyapong PK, Iwamura M, Staehle D, et al., 2014. Design considerations for a 5G network architecture. *IEEE Commun Mag*, 52(11):65-75.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6957145>
- Cai YL, Qin ZJ, Cui FY, et al., 2018. Modulation and multiple access for 5G networks. *IEEE Commun Surv Tutor*, 20(1):629-646.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698>
- Chen D, Qu DM, Jiang T, et al., 2013. Prototype filter optimization to minimize stopband energy with NPR constraint for filter bank multicarrier modulation systems. *IEEE Trans Signal Process*, 61(1):159-169.  
<https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2222397>
- Chen SZ, Zhao J, 2014. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE Commun Mag*, 52(5):36-43.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815891>
- Chen SZ, Sun SH, Wang YM, et al., 2015a. A comprehensive survey of TDD-based mobile communication systems from TD-SCDMA 3G to TD-LTE(A) 4G and 5G directions. *China Commun*, 12(2):40-60.  
<https://doi.org/10.1109/CC.2015.7084401>
- Chen SZ, Zhao J, Ai M, et al., 2015b. Virtual RATs and a flexible and tailored radio access network evolving to 5G. *IEEE Commun Mag*, 53(6):52-58.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7120045>
- Chen SZ, Zhang P, Tafazolli R, 2016a. Enabling technologies for beyond TD-LTE-Advanced and 5G wireless communications. *China Commun*, 13(6):iv-v.  
<https://doi.org/10.1109/CC.2016.7513197>
- Chen SZ, Sun SH, Gao QB, et al., 2016b. Adaptive beamforming in TDD-based mobile communication systems: state of the art and 5G research directions. *IEEE Wirel Commun*, 23(6):81-87.  
<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500105WC>
- Chen SZ, Qin F, Hu B, et al., 2016c. User-centric ultra-dense networks for 5G: challenges, methodologies, and directions. *IEEE Wirel Commun*, 23(2):78-85.  
<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7462488>
- Chen SZ, Hu JL, Shi Y, et al., 2016d. LTE-V: a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network. *IEEE Internet Things J*, 3(6):997-1005.  
<https://doi.org/10.1109/IIOT.2016.2611605>
- Chen SZ, Ren B, Gao QB, et al., 2017a. Pattern division multiple access—a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 66(4):3185-3196.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596438>
- Chen SZ, Hu JL, Shi Y, et al., 2017b. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G. *IEEE Commun Stand Mag*, 1(2):70-76.  
<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700015>
- Chen Y, Bayesteh A, Wu YQ, et al., 2018. Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 56(3):19-27.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700845>
- Dai LL, Wang BC, Yuan YF, et al., 2015. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Commun Mag*, 53(9):74-81.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263349>
- Ding ZG, Lei XF, Karagiannidis GK, et al., 2017. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends. *IEEE J Sel Areas Commun*, 35(10):2181-2195.  
<https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519>
- Ge XH, Tu S, Mao GQ, et al., 2016. 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wirel Commun*, 23(1):72-79.  
<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422408>
- IMT-2020(5G) Promotion Group, 2014. 5G vision and requirements. White Paper.
- IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015a. 5G network technology architecture. White Paper.
- IMT-2020(5G) Promotion Group, 2015b. 5G wireless technology architecture. White Paper.
- IMT-2020(5G) Promotion Group, 2017. 5G economic and social impact. White Paper.
- ITU-R, 2014. Future technology trends of terrestrial IMT systems. ITU-R M.2320-0.
- ITU-R, 2015. IMT vision—framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU-R M.2083-0.
- Larsson EG, Edfors O, Tufvesson F, et al., 2014. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun Mag*, 52(2):186-195.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761>
- Marzetta TL, 2010. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 9(11):3590-3600.  
<https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092>
- NGMN Alliance, 2015. NGMN 5G white paper.
- Nikopour H, Baligh H, 2013. Sparse code multiple access. Proc 24<sup>th</sup> Int Symp on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, p.332-336.  
<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156>



- Qi XT, Wu N, Huang H, et al., 2017. A factor graph-based iterative detection of faster-than-Nyquist signaling in the presence of phase noise and carrier frequency offset. *Dig Signal Process*, 63:25-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.12.011>
- Takahashi H, 2016. Study on new radio access technology—physical layer aspects. 3GPP Report TR38.802.
- Tian KD, Liu RK, Wang RX, 2016. Joint successive cancellation decoding for bit-interleaved polar coded modulation. *IEEE Commun Lett*, 20(2):224-227.  
<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2514279>
- Vakilian V, Wild T, Schaich F, et al., 2013. Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE. Proc IEEE Globalcom Workshop, p.223-228.  
<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6824990>
- Wang CX, Haider F, Gao XQ, et al., 2014. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Commun Mag*, 52(2):122-130.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736752>
- Wang HC, Chen SZ, Xu H, et al., 2015. SoftNet: a software defined decentralized mobile network architecture toward 5G. *IEEE Network*, 29(2):16-22.  
<https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7064898>
- Wang HC, Chen SZ, Ai M, et al., 2017. Localized mobility management for 5G ultra dense network. *IEEE Trans Veh Technol*, 66(9):8535-8552.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2695799>
- Wunder G, Jung P, Kasparick M, et al., 2014. 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. *IEEE Commun Mag*, 52(2):97-105.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736749>
- Yuan ZF, Yu GH, Li WM, et al., 2016. Multi-user shared access for Internet of Things. Proc 83<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conf, p.1-5.  
<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504361>
- Zhu M, Guo Q, Bai BM, et al., 2016. Reliability-based joint detection-decoding algorithm for nonbinary LDPC-coded modulation systems. *IEEE Trans Commun*, 64(1):2-14.  
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2487454>