

# 5G 空口统一框架初探:软件定义空口

## A Framework of 5G Air Interface: Software Defined Air Interface

倪吉庆/NI Jiqing  
孙奇/SUN Qi  
崔春风/CUI Chunfeng

(中国移动通信有限公司研究院,北京 100032)  
(China Mobile Research Institute, Beijing 100032, China)

为了适应未来移动互联网和物联网的爆炸式增长,下一代移动通信系统(IMT-2020)已就应用场景、用户需求、技术趋势及其他领域全面展开讨论。国际电信联盟无线部(ITU-R)于2015年6月定义了3类典型应用场景:增强移动宽带(eMBB)、大规模机器通信(mMTC)和低时延高可靠通信(URLLC)<sup>[1]</sup>。其中,eMBB一般考虑低频和高频两种场景,URLLC在业务分类中也经常被超可靠机器通信(uMTC)替代,如图1(a)所示。中国的IMT-2020推进组于2015年5月发布了5G概念白皮书,其定义了广域连续覆盖、热点大容量、低功耗大连接和低时延高可靠四大场景<sup>[2]</sup>。之后推进组于2015年底,具体细化了8个评估场景,如图1(b)所示。

面对未来如此多样化和差异化的业务,传统单一的空口架构很难进行高效地支撑。中国移动基于“绿色、柔性和极速”的5G愿景<sup>[3]</sup>,提出了

收稿时间:2016-02-16

网络出版时间:2016-04-21

基金项目:国家重点基础研究发展(“973”)规划(2010CB328200、2010CB328201);国家高技术研究发展(“863”)计划(2006AA01Z257);国家自然科学基金(60602058、60572120);国家科技重大专项(2009ZX03003-002-02)

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868(2016)03-0012-005

**摘要:** 提出了软件定义空口(SDAI)的设计理念和框架,认为通过SDAI可以对多个无线空口功能模块进行灵活编程配置,有效地满足不同场景需求,是未来5G空口设计的基本理念。基于SDAI统一框架,帧结构、新波形、新型多址、调制编码、双工模式和多天技术可以自适应配置,使得无线信号对业务场景“量体裁衣”。另外,基本功能模块的可编程性、可配置性和可共享性,都可有效地提升空口实现效率。

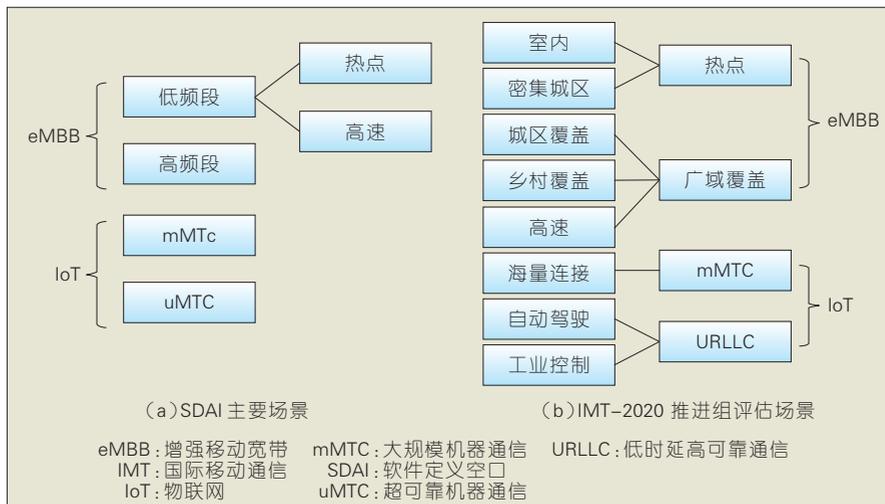
**关键词:** 5G; 软件定义空口; 灵活双工; 新型多址; 新波形

**Abstract:** In this paper, the design concept and framework of software defined air interface (SDAI) is proposed. And it also points that the multiple wireless air interface function module can be flexibly programmed and configured by SDAI, which effectively meet the needs of different scenarios. Under the unified framework, the frame structure, waveform, new multiple access, coding & modulation, duplex mode, and antenna configuration can be adaptively configured. It provides a flexible composition of sets of radio technologies, and programmable and configurable functions and parameters tailored to the application scenarios. By this way, the efficiency of air interface can be greatly improved.

**Keywords:** 5G; SDAI; agile duplex; new multiple access; new waveforms

“软件定义空口”(SDAI)的设计理念,以空口定制化的方式让无线信号“量体裁衣”。其基本思想是通过物

理层不同功能模块的可配组合来满足业务的多样化需求,这些功能模块包括帧结构、双工模式、波形、多址、



▲ 图1 SDAI 主要场景和 IMT-2020 推进组评估场景

调制编码、多天线技术以及频谱动态适用等。基本功能模块的可编程性、可配置性和可共享性,及尽可能共享功能模块,都可有效地提升空口效率。SDAI 通过优化的定制能力满足 eMBB、mMTC 和 uMTC 3 类典型场景需求。

## 1 SDAI 理念及框架

### 1.1 SDAI 基本理念

传统移动通信的演进一直以来都是以提升峰值速率和系统容量为主要目标,5G 将面临更加多样化的场景和极致的性能挑战。采用传统单一定制化的空口技术和参数设计无法满足上述需求。面对 5G 极为丰富的应用场景和极致的用户体验需求,5G 空口应该具备足够的“弹性”来适配未来多样化的场景需求,从而以最高效的方式满足各场景下不同的服务特性、连接数、容量以及时延等要求。此外,未来 5G 空口设计需要能够实现空口能力的按需及时升级,具备 IT 产业敏捷开发、快速迭代

的特征。从某种意义上讲,5G 将是“第 1 代多维度”通信系统标准,它将具备自我完善自我发展的能力。SDAI 的目标是建立统一、高效、灵活、可配置的空口技术框架,可针对部署场景、业务需求、性能指标、可用频谱和终端能力等具体情况,灵活地进行技术选择和参数配置。最终,形成 eMBB、mMTC 和 uMTC 3 类应用场景的空口技术方案,从而提高资源效率,降低网络部署成本,并能够有效应对未来可能出现的新场景和新业务需求<sup>[4]</sup>。

SDAI 的基本理念可以概括为如下两点:

(1)敏捷。SDAI 通过可编程可配置功能,实现空口技术灵活构造,以及针对用户和业务模式的参数裁剪能力;

(2)高效。SDAI 构建统一框架,支持不同场景和接入技术,最大化共性功能,同时在保持最小化特殊功能情况下,提供特殊定制化服务。

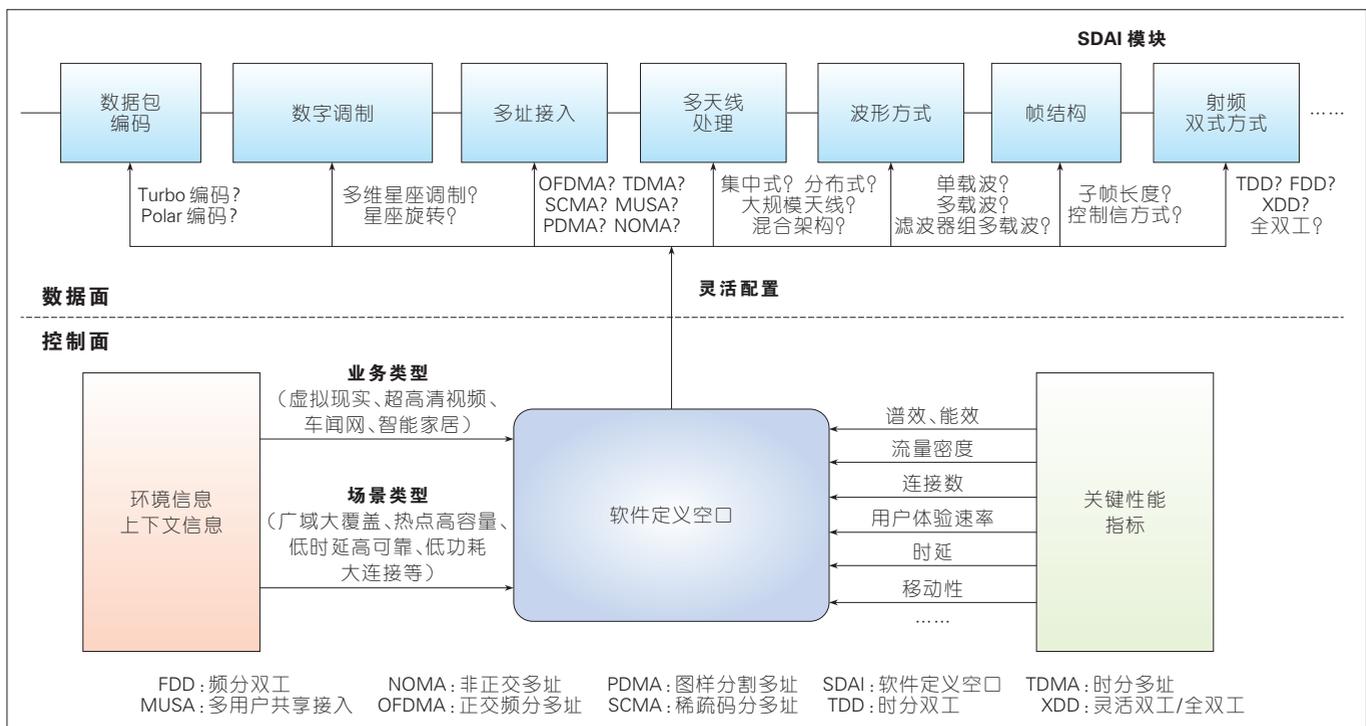
敏捷性体现在 SDAI 能够提供一一个足够多样性的技术集合和相关参

数集合,使得候选技术集合能够支撑不同场景与业务的极端需求。高效性体现在技术方案的性能与复杂度之间的折中。一方面是候选技术方案的数量要控制在一定的范围内;另外一方面是候选技术方案尽量使用统一的实现结构,复用相关实现模块,以提高资源的利用效率,降低商用化成本。

### 1.2 SDAI 技术框架

软件定义空口的基本框架如图 2 所示,其包含数据面以及控制面两个层面。数据面由多个信号处理功能模块构成。在控制面上,逻辑上的智能控制模块将会测量和收集上下文环境信息,例如:场景、业务类型和信道条件等,并根据系统预设的性能指标来决策和配置相应的数据面信号处理模块。此外,需要考虑上层协议栈重构以支持灵活统一空口管理的架构。

SDAI 的挑战主要来自两方面:一是根据场景、业务及链路环境的空口自适应机制;二是典型场景下的空口



▲ 图 2 软件定义空口框架

技术集合选取。在空口自适应机制方面,考虑到典型场景及终端类型的相对固定性,以及用户业务类型及用户链路的动态变化特点,空口自适应可以考虑两种不同时间粒度上的自适应配置:根据场景和部署的需要等进行半静态配置;针对用户链路质量、移动性、传输业务类型、网络接入用户量等动态变化的环境参数进行动态空口自适应配置。第1种半静态配置方式,时间变化周期较长,可以通过小区广播信道通知小区的空口配置情况,相应的空口配置可以依据5G场景归纳为几种典型的无线空口技术配置;第2种动态配置方式,时间变化周期短并且具有用户区分性,需要通过控制信道向用户实时通知其空口配置参数,并且动态配置方式会以半静态的配置为基础,依据信道环境变化、上下行业务量、用户移动性以及传输业务类型等瞬时变化。此外,考虑统一空口架构,可将空口的数据处理和参数配置分层,将数据处理层中的功能模块通过标准的应用程序接口开放给空口配置层,空口配置层通过无线资源管理功能按需进行配置。

## 2 SDAI 关键使能技术

SDAI的核心在于提高空口的灵活性,使得空口在承载不同业务时可以具有不同的传输特征以最佳匹配业务的需求。这种灵活的空口配置需要相应空口技术的支持,如统一自适应的帧结构、灵活的双工、灵活的多址、灵活的波形、大规模天线、新型调制编码及灵活频谱使用等。

### 2.1 自适应帧结构

自适应帧结构是实现SDAI灵活高效设计理念的基础。其灵活设计可以支撑5G场景和业务的多样性,统一架构可以减少干扰并实现高效性。SDAI帧结构类似一个容器,承载着多种无线空口技术。比如,对于mMTC业务,可能需要设计专门的窄

带系统;对于高频段热点场景,采用单载波技术,需要全新的帧结构设计;采用多载波技术,较大的子载波间隔是降低复杂度和峰均比及对抗频偏影响的有效途径。对于低时延业务,更短帧及更快速的上下行切换是实现低时延性能的保障<sup>[5]</sup>。此外,灵活双工、新波形等新技术应用也需要新型帧结构进行支撑。图3给出了一种带内灵活帧结构的设计实例。其通过复用和绑定一些基本单元,可以提供可扩展的传输时间间隔(TTI),以匹配不同的业务。另外,基于非正交波形的帧结构,可以有效地支持异步传输。

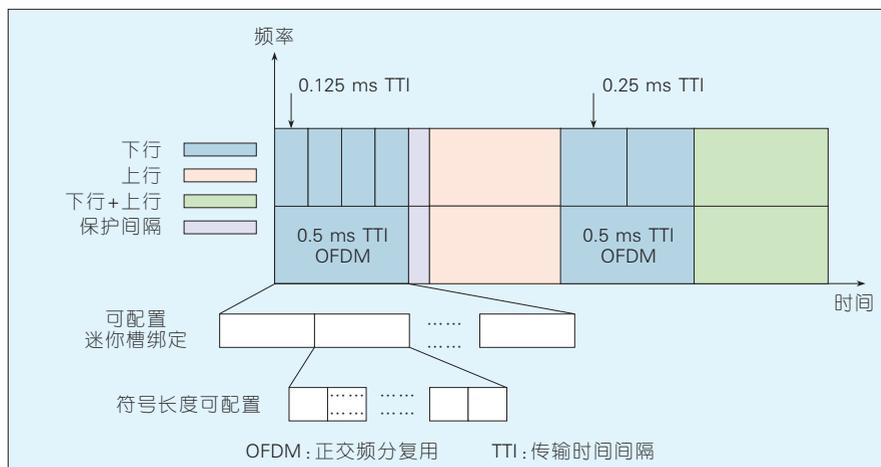
### 2.2 灵活双工

随着未来上下行业务随时空变化越加明显,采用目前相对固定的时分双工(TDD)资源分配无法适应动态变化需求。灵活双工作为一种有效利用上下行资源的方式,可以动态配置时频资源以适配上下业务流量;也可以在半双工和全双工方式间进行转换,从而根据整个系统业务需求进行灵活调整<sup>[6]</sup>。应用灵活双工以及全双工需要解决该技术带来的大量干扰问题,其干扰抑制是未来应用亟待解决的问题。全双工和灵活双工方式重点应用为孤站的热点高容量需求场景,因为在此场景下,系统干扰主要是基站自身发射对接收的干

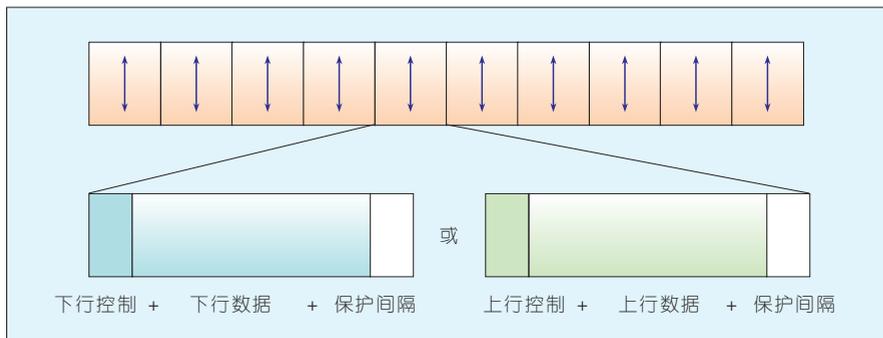
扰和小区内干扰。通过引入云无线接入网(C-RAN)架构,基站可以进行联合信号处理,全双工和灵活双工也可以应用在广域连续覆盖和热点高容量连续覆盖场景<sup>[7]</sup>。图4为一种灵活双工帧结构实例。其每个子帧均可任意为上行传输或者下行传输,不再局限于现有系统中的固定上下行配置。

### 2.3 灵活多址

当前5G多址技术主要包括现有的正交多址技术:正交频分多址(OFDMA)、单载波频分多址(SC-FDMA),以及正在研究的多用户共享接入(MUSA)、非正交多址(NOMA)、图样分割多址(PDMA)和稀疏码分多址(SCMA)等非正交多址技术<sup>[8]</sup>。面对5G更为多样化的业务场景,需要灵活的多址技术匹配不同的场景与业务需求。新型多址技术主要面向低功耗大连接场景和低时延高可靠场景,目标是针对物联网场景,在满足一定用户速率要求的情况下,尽可能地增加接入用户数量,同时支持免调度接入,降低系统信令开销、时延和终端功耗。其中,非正交多址接入技术通过多个用户在时域、频域、空域或码域上的复用,可大大提升用户连接数。由于用户有更多机会接入,网络整体吞吐量和频谱效率可显著提升。此外,面对低延时或低功耗的



▲图3 一种自适应帧结构实例



▲图4 一种灵活双工帧结构实例

业务场景,采用非正交多址接入技术可以更好地实现免调度竞争接入,实现低延时通信,并且减少开启时间,降低设备功耗。

#### 2.4 灵活多天线

大规模天线是5G关键技术之一,由于空间自由度的大幅度提高,可以有效地提升系统谱效、能效、用户体验及传输可靠性,同时也为异构化、密集化的网络部署提供了灵活的干扰控制与协调手段。未来主要应用场景有广域连续覆盖和热点高容量。广域宏基站部署对天线阵列尺寸限制小,使得在低频段应用大规模天线技术成为可能。其可以发挥高赋型增益等特点增强小区覆盖并提升小区边缘用户性能。另外,预波束跟踪等先进技术可以对高速移动场景进行支撑。在热点场景,大规模天线和高频段通信可以很好地结合,支持极高的速率传输<sup>[9]</sup>。分布式天线与新型网络构架可以有机地融合,实现异构化、密集化的网络部署。

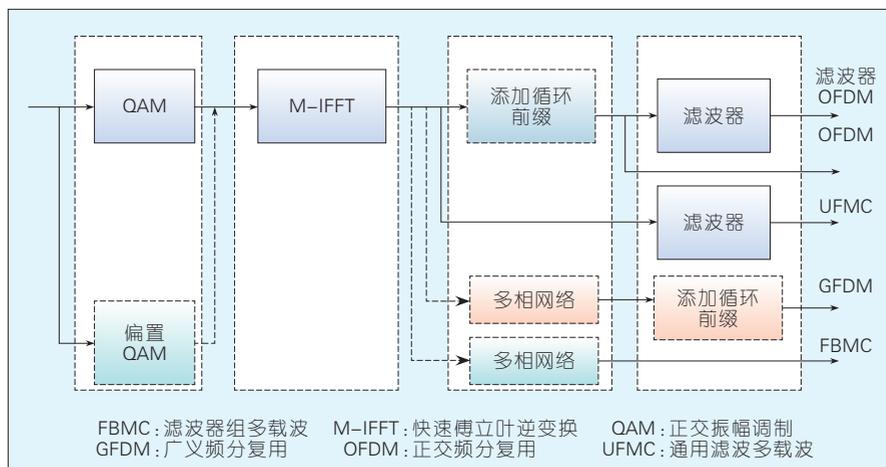
#### 2.5 灵活波形

OFDM作为无线宽带传输技术,不仅在4G中广泛使用,也是5G重要候选波形。基于滤波器的新波形技术<sup>[10]</sup>,例如通用滤波多载波(UFMC)、基于滤波的OFDM(f-OFDM)、广义频分复用(GFDM)、滤波器组多载波(FBMC),可以有效地降低带外泄露,且不需要严格的同步,可以满足未来急剧增长的窄带小包业务传输需求

和异步海量终端接入,并支持碎片化的频谱接入。对于毫米波频段,考虑到功耗、复杂度等问题,单载波成为可能的技术候选。对于高速场景,正交时频偏移(OTFS)波形由于对多普勒频偏的鲁棒性,引起了学术界和产业界广泛的注意。目前,如何设计合理波形以满足5G典型场景的挑战,以及如何实现多种波形的灵活聚合,以同时提供多样化的业务体验,是亟需解决的关键问题。图5描述了一种新波形发射机实现结构,其最小化硬件功能单元以降低复杂度,并通过灵活参数配置,实现多种不同的波形方案。例如,如果5G采用带内支持eMBB和mMTC两种业务,此架构可以生成OFDM匹配eMBB,同时可以生成非正交波形以匹配mMTC业务。

#### 2.6 高级调制编码

Turbo 编码与正交振幅调制



▲图5 一种新波形统一实现构架

(QAM)已在现有系统中广泛应用,但未来不排除一些新型的调制编码技术。其中,面向eMBB场景下的大码块,多元域低密度奇偶校验码(LDPC)具有更优异的码字纠错性能,且更容易和多天线、高阶调制方式相结合,成为5G潜在的关键技术。极化码具有优良的差错性能且编译码复杂度相对更低,这一特点可以被用于增强覆盖,提高传输效率,适用于广域覆盖、低功耗大连接等场景<sup>[11]</sup>。网络编码能够通过多跳传输机制来增加系统的总吞吐量,也成为5G潜在的候选方案<sup>[12]</sup>。

#### 2.7 灵活频谱使用

面向eMBB大容量高速率场景,6 GHz以下的低频段资源对增强覆盖至关重要,高频段大带宽是热点地区提升系统容量的有效手段。高低频协作是满足eMBB场景的基本方式。同时,新型的频谱使用方式也是5G提升系统容量的重要补充手段,比如授权共享使用(LSA),允许多个运营商以同等的授权接入某些频段<sup>[13]</sup>。mMTC场景通常是低速率的小包传输,覆盖必须得到保障,因此低频段(尤其是<1 GHz的频段)具有更高的优先权。授权频谱是mMTC的保障,其他频谱使用方法有待研究。uMTC是低时延高可靠场景,因此需要授权频谱保证其极高的可靠性要求,其他

▼表 1 典型场景候选技术集合

典型场景	广域连续覆盖 (<6 G)	高密度流量 (中高频)	低功耗大连接 (低频段 <1 G)	低时延高可靠 (<6 G)
技术需求	移动性, 高数据速率	大带宽, 高数据速率	大连接, 深覆盖, 低功耗	低时延, 高可靠, 异步突发
波形	DL: OFDM UL: DFT-S-OFDM 高速: OFDM 或 OTFS	OFDM 或单载波	OFDM 或非正交波形	OFDM 或非正交波形
多址	DL: 正交或 MUST	正交	UL: 非正交	UL: 正交或非正交
调制编码	Turbo&QAM 或多元域 LDPC	大数据块编解码能力	低复杂度 Polar 码, 卷积码	快速编解码能力
双工	动态 TDD/全双工	TDD	TDD/FDD	TDD/FDD
多天线	大规模天线	数模混合 mMIMO 或单天线	天线数目较少	天线数目较少或大规模天线
帧结构	动态 TTI, 动态上下行配比	较大载波间隔	半静态上下行配比长 TTI	半静态上下行配比短 TTI
备注: 不同典型场景下的帧结构尽量保证一致性设计, 以避免带内干扰; 此表仅表示作者当前认知下的观点, 未来可能根据技术的成熟度, 进行调整。				
DFT-S-OFDM: 基于 DFT 扩展的正交频分复用 DL: 下行链路 FDD: 频分双工 LDPC: 低密度奇偶校验码				
mMIMO: 大规模天线 MUST: 多用户叠加传输 OFDM: 正交频分复用 OTFS: 正交时频空域调制 QAM: 正交振幅调制				
TDD: 时分双工 TTI: 传输时间间隔 UL: 上行链路				

频谱使用方法暂不考虑。5G 典型场景各有不同的频谱需求, 因此 5G 必须在相应授权规则下, 灵活地工作在不同的频段, 以灵活自适应的机制来实现系统操作和控制。

### 3 典型场景下的技术集合

通过分析 5G 关键使能技术特点及适用场景, 在 SDAI 统一框架指导下, 总结了典型场景下的候选技术集合, 见表 1。各技术方案应基于统一的架构实现, 尽量复用相关实现模块, 以提高资源的利用效率, 降低商用化成本。

### 4 结束语

从“绿色、柔性和极速”研发理念出发, 我们提出了一种 5G 空口统一框架——软件定义空口, 它通过建立统一、高效、灵活、可配置的空口技术框架, 可灵活地进行技术选择和参数配置, 以满足多样化业务和场景需求。SDAI 能够实现空口能力的按需及时升级, 具备敏捷开发、快速迭代的特征。另外, 我们还重点对 SDAI 的关键使能技术进行了介绍, 给出了

eMBB、mMTC 和 uMTC3 类典型场景的空口技术集合, 供产业参考。

#### 参考文献

- [1] ITU-R WP5D. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. USA: ITU-R M, 2015
- [2] 中国 IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书 [R]. 北京: IMT-2020, 2015
- [3] CHUIH L I, ROWELL C, HAN S F, et al. Toward Green and Soft: A 5G Perspective [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 66-73
- [4] 未来论坛 5G SIG. Rethink Mobile Communications for 2020+ [R]. 2014
- [5] HAN H F, CHUIH L I, XU Z K, et al. Full Duplex: Coming into Reality in 2020[C]//2014 IEEE Global Communications Conference. USA: IEEE, 2014: 4776-4781. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037562
- [6] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81
- [7] 中国移动. C-RAN: 无线接入网绿色演进白皮书 V3.0 [R]. 北京: 中国移动, 2013
- [8] HAN S F, CHUIH L I, XU Z K, et al. Large Scale Antenna Systems with Hybrid Analog and Digital Beamforming for Millimeter Wave 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186-194. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010533
- [9] WANG H L, PAN Z G, CHUIH L I. Perspectives on High Frequency Small Cell with Ultra Dense Deployment[C]//2014 IEEE

International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN). USA: IEEE, 2014: 263-270. DOI: 10.1109/ICCCChina.2014.7008329

- [10] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5G NOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736749
- [11] ABBE E, TELATAR I E. Polar Codes for the M-User Multiple Access Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(8): 5437-5448. DOI: 10.1109/TIT.2012.2201374
- [12] PAN C K, LIU J J, HU Z P. Detection Algorithms for Physical Network Coding [C]//2012 CHINACOM, 2012. USA: IEEE, 2012: 63-67. DOI: 10.1109/ChinaCom.2012.6417449
- [13] AHOKANGAS P, MATINMIKKO M, YRJOLA S, et al. Business Models for Mobile Network Operators in Licensed Shared Access (LSA) [C]//2014 Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN). USA: IEEE, 2014: 263-270

#### 作者简介



倪吉庆, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心研究员; 主要研究方向为 5G 无线关键技术, 及关键技术原型平台设计; 已发表论文 10 多篇。



孙奇, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心研究员; 主要研究方向为 5G 无线关键技术, 具体包含新型多址与新波形、超密集网络下的干扰管理、高效无线资源管理等; 已发表论文 20 多篇, 申请专利 10 余项。



崔春风, 中国移动研究院绿色通信技术研究中心主任; 主要研究方向为 5G 无线及网络架构、虚拟化无线网络技术、无线节能技术等; 已发表论文 10 多篇。