



专题：5G

5G 新空口设计：如何从 LTE 拓展与创新

童辉

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要：在“万物互联”愿景的驱动下，国际电信联盟为 5G 提出了高速率、低时延、海量连接三大应用场景以及相关的性能指标需求。相应地，国际标准组织 3GPP 中完成了具体技术研究和标准化，形成了 5G 新空口的设计。首先，对于为何 5G 新空口设计可以重用 LTE 的基础设计进行了分析，亦即 MIMO-OFDM 的框架是如何满足国际电信联盟定义的三大需求的；其次，对 5G 新空口与 LTE 的重点差异进行了总结，包括新架构、新设计、新频段、新天线“四新”的具体内容。最后对未来技术发展趋势做了简单的介绍。

关键词：5G；新空口；LTE；关键技术；场景；需求

中图分类号：TP393

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019184

5G new radio design: why/how to extend/innovate from LTE

TONG Hui

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Driven by the 5G visions including “wireless infrastructure to connect the world”, ITU has defined the three main usage scenarios of 5G: eMBB, mMTC, and uRLLC, and the consequent requirements (performance metrics) are defined as well. Then, 3GPP completed technical studies and standards towards satisfying ITU requirements, namely 5G new radio (NR). Two essential aspects of 5G NR were discussed. Firstly, why can 5G NR reuse the basic technology of 4G LTE was discussed, i.e., how does the MIMO-OFDM framework satisfy ITU 5G requirements. Secondly, what innovations had been done in 5G NR, comparing with LTE, including some details on the four new features of 5G NR, namely “new architecture, new design, new bands, new antenna”. The future technology trends were briefly introduced in the conclusion section.

Key words: 5G, new radio, LTE, key technology, scenario, requirement

1 引言

自 2015 年国际电信联盟 (ITU) 正式发布 5G 的愿景和需求以来^[1]，以高速率、低时延、海量

接入为应用场景的技术、标准、产品与网络等在全球范围内快速发展并被广泛讨论，形成了一股全球部署 5G、全民谈论 5G 的热潮。在这股热潮中，逐渐出现了两种观点：第一种是“5G 物理层

收稿日期：2019-06-03；修回日期：2019-07-08

基金项目：国家科技重大专项基金资助项目 (No.2017ZX03001028)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2017ZX03001028)



没有实质性的革命性技术出现,因此 5G 必将是一代失败的技术”;第二种是“5G 性能大大超越 4G,因此当 5G 网络部署之后就可以立刻享受到高速率、低时延且海量接入的服务”。从业内技术人员的角度来看,第一种观点过于悲观,第二种观点则过于乐观。本文的第一部分主要讨论如何从技术角度出发理性客观地看待 5G,包括 5G 的革命性、性能和商业机会等,从而对 5G 形成一个合理的预期。

对于第一种观点,在某种程度上确实可以说 5G 物理层没有实质性的革命性技术出现^[2],没有出现像 4G OFDM 取代 3G CDMA 那样的革命性变革。但是,MIMO-OFDM 架构本身就具有极强的弹性,在 4G 系统中其潜力还远远没有达到尽头。如本文第 2 节中所讨论的,重用 MIMO-OFDM 架构并加入新的参数集,仍然可以完好地适配 5G 的多种场景以及满足 5G 的各种极致性能指标。考虑到 4G 中的 MIMO-OFDM 已有完好的全球产业链和部署经验,重用 MIMO-OFDM 架构能够最快速、最有效地形成 5G 的整体生态系统,可以说是 5G 最自然也最恰当的选择。因此,绝不是说重用 MIMO-OFDM 架构就意味着 5G 将是失败的一代;恰恰相反,重用 MIMO-OFDM 架构才是 5G 能够同时获得技术和商业成功的关键。

对于第二种观点,在本文的第 2 节也进行了相关的计算。首先,极高峰值速率、超低时延和海量连接这 3 个 5G 的标志性指标是无法同时达到的,相反地,这 3 个指标是分别在不同的场景下满足的,这也是 ITU 设计这 3 个指标的原意;其次,就算是只满足其中的一项极致指标,都需要对参数集和相关技术进行大量的专门设计,而且要在实际产品中实现绝非易事。因此,5G 的初期部署仍然不可避免地以 eMBB 业务为主,而且实际系统中传输速率虽然肯定比 4G 大大提高,但必然与 ITU 定义的峰值速率指标相差甚

远;而需求超低时延的业务(如车联网和工业互联网等),其标准进度要比 eMBB 业务至少落后一到两年^[3-4],再考虑到政策管制、垂直行业融合程度等多方面因素,很可能要在 5G 部署一段时间以后才能开始商用。总的来说,一方面 5G 设计本身具有足够的弹性和潜力去满足“万物互联”的愿景,另一方面也要看到 5G 的部署,尤其是面向垂直行业的部署,仍然处于比较初步的阶段,需要大量的努力来收集需求,优化技术与标准以及树立若干标杆性应用才能真正完成落地。因此,一方面要对 5G 的基本设计抱有足够的信心,大力迎接“万物互联”的社会,另一方面也需要认识到工作的难度,认识到 5G 网络部署后可能还需要长期不断的优化和更新,而不是一个可以一蹴而就的单次事件。

2 场景与需求: 5G 为何从 LTE 拓展/创新而来

2.1 场景与需求的对应关系

ITU 的 5G 愿景与需求如图 1 所示,ITU 为 5G 提出了三大应用场景、即增强移动宽带(eMBB)场景、海量机器类通信(mMTC)场景以及超高可靠低时延通信(uRLLC)场景。ITU 还对 5G 的极限性能指标做了要求,其中最为引人注目的是峰值速率(下行 20 Gbit/s,上行 10 Gbit/s),每平方千米百万连接数以及 1 ms 的用户面时延 3 个指标。但是需要说明的是,在同一个 ITU 的愿景与需求文档^[1]中,明确指出了 3 个指标分别对应于 3 个不同的场景,是不会同时获得的。应用场景与极致指标之间的对应关系如图 2 所示,10 Gbit/s 峰值速率的指标对应于增强移动宽带场景,百万连接数的指标对应于海量机器通信的场景,而 1 ms 用户面时延对应于超高可靠低时延的场景。试图在一个场景中同时满足其中两个甚至三个极致指标的技术方案应当归类于更下一代无线通信(如 6G)的范畴。

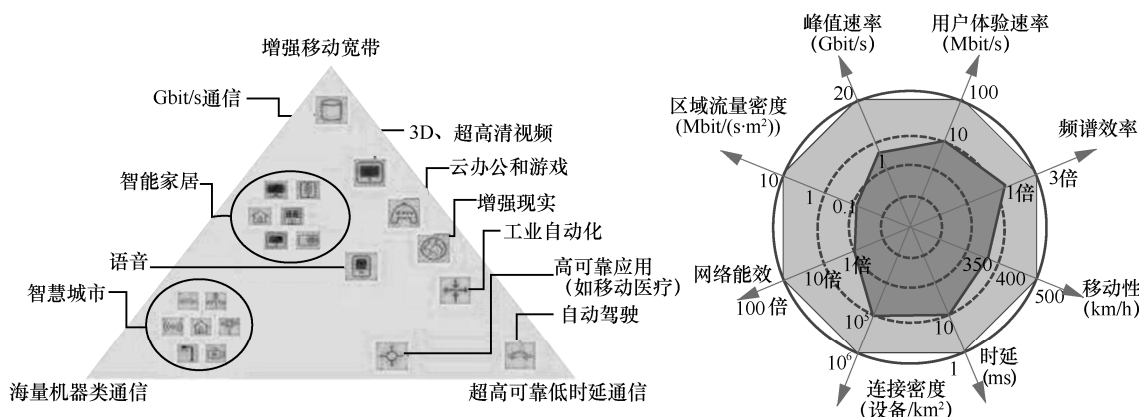


图1 ITU 的 5G 愿景与需求 (性能指标)

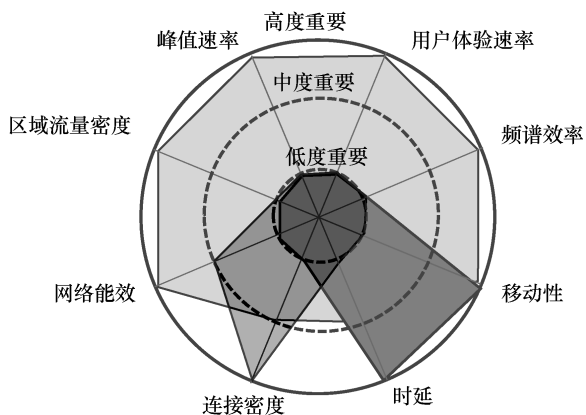


图2 应用场景与极致指标之间的对应关系

2.2 峰值速率

4G 与 5G 的峰值速率对比见表 1, 4G 时代定义的峰值速率为 100 Mbit/s, 而 5G 的峰值速率为 20 Gbit/s, 是 4G 的 200 倍。要达到这样高的峰值速率, 势必需要极高的带宽。为了解具体需要多少带宽才能达到 20 Gbit/s 的峰值速率, 可以先计算 100 MHz 带宽下的峰值速率是多少。下面的计算方法参考了参考文献[6]并针对本文做了必要的改动。

表 1 4G 与 5G 的峰值速率对比

	4G 需求 ^[5]	5G 需求
下行	100 Mbit/s (20 MHz 带宽)	20 Gbit/s
上行	50 Mbit/s (20 MHz 带宽)	10 Gbit/s

假定终端能够接收 8 流传输 (标准规定的最大的单用户流数), 使用较低的参考信号和控制信道开销 (14%), 使用最高的调制与编码策略 (256QAM, 0.925 码率) 以及较为均衡的上下行配比 (DSUUD), 可以得到 100 MHz 带宽的下行峰值速率约为 2.2 Gbit/s, 见表 2。类似地, 可以得到 100 MHz 的上行峰值速率约为 1.2 Gbit/s。因此, 要达到 5G 需求的峰值速率, 共需 900 MHz 的带宽。目前来看我国在 6 GHz 以下已发放的所有电信业频谱加起来尚不足 900 MHz, 因此要达到 20 Gbit/s/10 Gbit/s 的峰值速率, 毫米波频段属于必不可少的部分。

在我国部署的实际系统中, 第一波部署都是使用 100 MHz 带宽的系统, 加上终端实际只能接

表 2 100 MHz 带宽的峰值速率

下行峰值/ (Gbit·s ⁻¹)	调制	码率/ (Gbit·s ⁻¹)	开销	RE per RB	RB 数	slot 长度/ ms	流数	TDD 配比	特殊子帧
2.2	8	948/1 024	14	156	273	0.5	8	DSUUD	626
1.2	6	948/1 024	67	168	273	0.5	4	DSUUD	626



收 4 流及发送单流或双流，再加上帧结构需要考虑多方面因素，再加上实际终端需求的参考信号开销增加，实际系统中的下行峰值速率在 1.4 Gbit/s，上行峰值速率在 100 Mbit/s/200 Mbit/s（单发/双发）左右。再考虑到实际系统中能够享受到峰值速率的终端数量极其有限，用户能够体验到的速率仍然比 LTE 有大幅提高（例如约 10 倍），但是离 ITU 定义的峰值速率（200 倍）仍然相差甚远。

从上面的分析可见，MIMO-OFDM 的架构仍然可以较为直接地满足 5G 峰值速率的需求，但是需要在带宽、多天线、帧结构、开销等方面都要做到极致的优化。在第一波 5G 部署中，是难以在实际系统中出现这样高的峰值速率的。

2.3 时延

时延是 5G 系统最引人注目的指标之一，尤其是 1 ms 时延的特性可以使能众多新应用，如远程医疗、自动驾驶等。4G 与 5G 的时延需求总结见表 3。

表 3 4G/5G 时延需求对比

	4G 需求/ms	5G eMBB/ms	5G uRLLC/ms
用户面时延	5	4	1
控制面时延	100	—	10

用户面时延主要包括基站处理时延、子帧对齐时延、传输时延以及终端处理时延 4 部分。按照参考文献[7]中的计算，对于 4 ms 的 eMBB 用户面时延，30 kHz 子载波的 TDD 和 15 kHz 子载波的 FDD 系统都可以较为轻松地满足。但是，对于 1 ms 的 uRLLC 用户面时延，要想满足需要系统做出大量的极致优化，例如在 FDD 系统中使用 30 kHz 子载波+上行免调度+7 符号短帧的技术组合，在 TDD 系统中使用 120 kHz 子载波+上行免调度的技术组合。这两种配置都是在第一波网络部署时没有的配置，尤其是考虑到 120 kHz 子载波只能在毫米波频段使用，在 TDD 系统中如何真正满足 1 ms 时延还需要继续探索与优化（例如更

多上下行转换点的帧结构等）。

类似地，控制面时延指终端从空闲态到连接态的时延，主要包括随机接入过程的 5 条信令（msg 1~5）以及完成 RRC 连接所需的信令交互，在 4G 中其指标为 100 ms。简单地将子载波从 15 kHz 改为 30 kHz 可以适当缩短控制面时延，但是离 10 ms 的指标还相差甚远。按照参考文献[8]中的计算，需要引入 4 符号的短帧或 120 kHz 的子载波，才能满足 10 ms 控制面时延的需求。同样地，在第一波网络部署中，尚难使用短帧和 120 kHz 子载波这样的特性，因此实际的控制面时延不可能满足 ITU 定义的时延指标。

按照现在的第一波 5G 部署的特性，用户面双向时延大约在 10 ms 以上（下行约 4 ms，上行比下行时延更长，因此双向时延大约在 10 ms 以上），独立组网的控制面时延约在几十毫秒，非独立组网的控制面时延更长。

因此，与峰值速率类似，MIMO-OFDM 架构能够满足 1 ms 的时延需求，但是需要对整体的参数集和技术组合做全面的优化。在 5G 的第一波部署中不包含这些优化，因此近期的 5G 用户也尚难体验到 ITU 所定义的极致指标。

2.4 连接密度

5G 的连接密度需求为每平方千米百万连接数，在 4G 中没有相关的需求，但是在 NB-IoT 的设计中有定义过每扇区每载波五万连接数的需求并能实际部署^[9]。因此，大致上 MIMO-OFDM 的架构只需要最多 20 个 NB-IoT 载波（大约 4 MHz 带宽）即可满足 ITU 需求。但是，需要注意的是，参考文献[10]中能够满足每扇区每载波五万连接数的前提是终端每两小时上传 200 byte 数据，并能容忍 10 s 以内的时延。因此，百万连接数的需求天生是和峰值速率/时延的指标冲突的。

在参考文献[10]中对 5G 中的连接密度进行了系统级和链路级的评估，从评估结果来看，NR、NB-IoT 和 eMTC 3 项技术都能满足连接密度的需

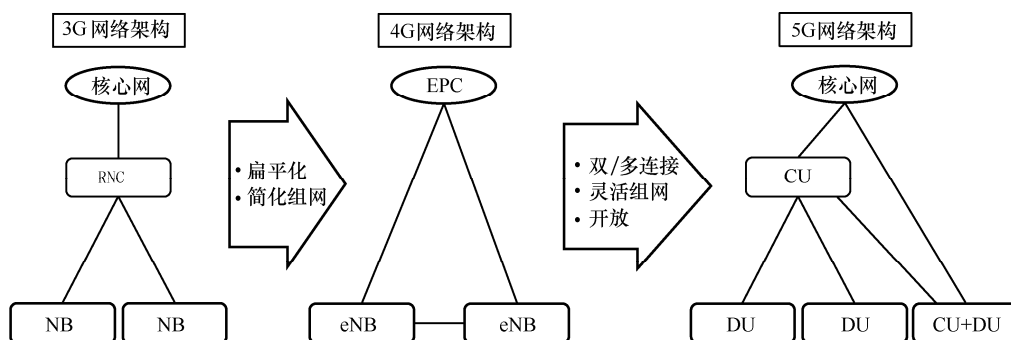


图3 无线网架构演进

求(在满足上述流量模型和时延的前提下)。但是,上述流量模型主要面对低成本抄表业务,相应的5G NR 终端上不成熟。在近期的实际部署中,面向海量连接场景的部署可能还是应当以 NB-IoT 为主,而不是5G NR。

综合上面的讨论,可以看到 MIMO-OFDM 架构可以完好地在3个不同场景下满足ITU的需求,加上其完善的产业链,可以说选用 MIMO-OFDM 架构是5G 设计的一个正确选择。从另一方面来说,要在实际系统中满足ITU的极致指标,需要大量的参数集优化和技术组合优化,在第一波5G部署尚难做到相关优化的情况下,或许尽力提高用户/垂直行业的体验才是明智之举,而不是简单追求实现ITU制定的极致指标。

3 无线关键技术:5G 如何从LTE 拓展/创新而来

为满足5G多场景和多样化的业务需求,5G无线网络在MIMO-OFDM的架构上进行了全新的设计,具备新架构、新设计、新频段、新天线四大关键技术特征。

3.1 新架构(CU-DU架构)

无线系统的架构在3G/4G/5G中经过了一系列的改动。在3G中核心网通过RNC节点控制基站,而在4G中为了降低时延,将RNC节点去除,改为基站直接通过S1界面接入核心网。由于5G时代提出了新的组网需求,包括多基站协同、网

络能力开放以及超低时延传输等,在5G中引入了CU-DU的网络架构,如图3所示。其中,集中单元(central unit, CU)负责完成实时性较低的RRC/PDCP层功能,而分布单元(distributed unit, DU)完成实时性较强的RLC/MAC/PHY层功能,如图4所示。

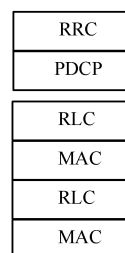


图4 CU-DU 功能分割

从多基站协同的角度来看,在5G中大量使用了非独立组网的架构,其中锚点载波一般位于较低的载频,使用LTE制式为终端提供控制面和移动性管理,而5G载波一般位于较高的载频,为终端提供数据服务。在此情况下,一个锚点载波会为若干个5G载波提供控制面服务,此时无线网本身就呈现集中—分布的结构,使用CU-DU的架构也能够较好契合无线网本身就有的结构。更广泛地说,对于任何异构网(宏基站+微基站)的部署场景,CU-DU的架构都能够的多基站协同方面发挥作用,从而提升空口性能。

从超低时延传输来看,核心网侧的时延一般远高于无线侧。为实现5G“万物互联”的愿景,有必要将部分内容和计算下沉到网络边缘(如基



站机房或核心网边缘)，即 MEC (mobile edge computing)，以便满足 AR/VR 等业务的超低时延需求。当部署 MEC 时，MEC 的节点不可避免地会与多个基站连接，即天生具有集中—分离的架构，也是 CU-DU 结构应用的重要场景。当 CU 与 MEC 部署在同一个硬件平台上时，CU 和 MEC 可以是两个独立的逻辑单元，也可以适当地协作以更好地降低时延。

从网络能力开放方面来看，由于无线网的底层设备（尤其是 PHY 物理层设备）在现阶段尚难实现云化的硬件架构，必须将网络的高层和底层功能分割开来，才有可能在 CU 一侧实现云化并对外开放，也就是说，CU-DU 架构是网络能力开放的硬件前提。当使用 CU-DU 架构时，CU 侧处理实时性较低的高层功能，可基于通用服务器架构，也可采用传统专用架构实现；DU 侧负责实时性要求很高的层二功能，涉及高速数据交换、大量并行密集型复数矩阵运算，一般仍采用电信专用架构配合硬件加速器实现。其中，CU 侧可从云化的资源池中提取资源，并将能力（如定位等）向外部开放，以达到网络能力开放、生态系统共赢的最终目的。

在实际部署中，CU-DU 可采用较为灵活的部署方式，既可以采用 CU/DU 合设的方式，也可以采用 CU/DU 分离的方式，如图 5 所示。当 CU/DU 合设时，可采用专用硬件架构，实际功能上类似于传统的 BBU，由主控板和基带板组成。一般将 CU 功能承载在主控板上，DU 功能承载在基带板

上；后续需要实现 CU/DU 分离时，去掉 CU 功能（主控板）即可将此设备作为 DU 来使用。当 CU/DU 合设时，CU 和 DU 一般只能采用同厂商的设备。当 CU/DU 采用分离方式部署时，CU 和 DU 可能采用不同厂商的设备，此时 CU 必须采用标准规定的接口。当 CU/DU 分离时，一般建议 CU 可使用通用服务器架构。

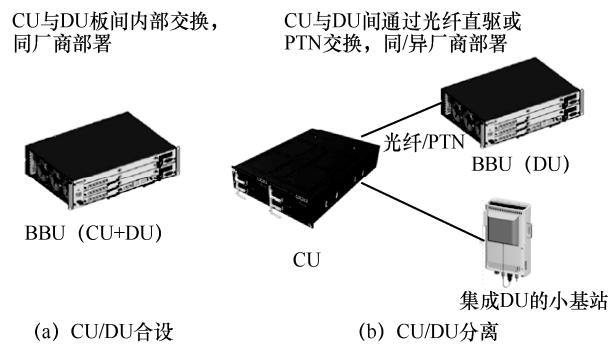


图 5 CU/DC 的实际部署形态：合设与分离

3.2 新设计（灵活帧结构）

5G 无线网的另一项新变革在于引入了灵活的帧结构，使用统一的空口设计满足了不同频段（中低频和毫米波）、不同场景（eMBB 和 uRLLC）以及不同双工方式（TDD 和 FDD）的需求，即相比于 4G 的固定帧结构，5G 帧结构可以采用多种参数（如上下行配比、子载波带宽、系统带宽等），灵活适配不同的需求。

在帧结构方面，4G 采用的是静态帧结构，即在系统消息中配置预设的 7 种帧结构之一。在 5G 中，帧结构采用的是可配置的静态/半静态帧结构，结构参数见表 4，即在系统消息中配置下行时

表 4 5G 帧结构参数

	LTE	中低频 5G	毫米波 5G
帧结构	静态帧结构	半静态帧结构	半静态（或动态）帧结构
子载波带宽	15 kHz	15 kHz/30 kHz, 60 kHz (data)	60 kHz/120 kHz
系统带宽	max 20 MHz	max 100 MHz	max 400 MHz
子帧长度	14 符号	14/7/4/2 符号	14/7/4/2 符号
交叉时隙干扰	基站实现	远端基站干扰	上下行交叉时隙干扰

长、上行时长以及周期等参数,形成灵活的帧结构配置参数。更进一步地,5G 系统中还可以配置部分子帧为灵活子帧,当实际数据到达的时候再将其半静态/动态配置为具体的上行或下行子帧,可有效地提升频谱效率以及降低时延。

在子载波带宽方面,4G 采用的是固定 15 kHz 的子载波带宽。在 5G 系统中有多种子载波带宽可选:在 6 GHz 以下的中低频段系统中,可选用 15 kHz、30 kHz、60 kHz 的子载波带宽进行数据传输;在毫米波系统中,可选用 60 kHz/120 kHz 的子载波带宽进行数据传输。在目前的中低频商业部署中,主要采用的是 30 kHz 的子载波带宽,主要原因在于 5G 的频段相比 4G 普遍有所升高,而且面向的移动速度也更高,因此 30 kHz 比 15 kHz 更为契合 5G 的需求。在毫米波系统中,主要商用的是 120 kHz 的子载波带宽,除了频段更高的原因以外,也是为了更好地消除毫米波频段特有的相位噪声。

在系统带宽方面,4G 单载波最大带宽为 20 MHz,在 5G 中引入了更大的系统带宽:在 6 GHz 以下的中低频段系统中,最大系统带宽为 100 MHz;在毫米波频段中,最大系统带宽为 400 MHz。系统带宽的增加可以有效应对 5G 频段普遍带宽较宽的场景(如 3.5 GHz 载频有 200 Mbit/s 带宽,毫米波频段经常有 GHz 的带宽),避免不必要的过多的载波聚合。此外,当系统带宽增大以后,如果终端长时间在整个带宽上准备接收数据,会造成终端功耗的大幅增加。为此,5G 中特地引入了初始接入带宽的概念,即在接收到系统消息之后,终端只在系统消息占用的带宽(举例 20 MHz 左右)上准备接收数据,从而大大降低了终端功耗。只有当高速率业务到来时,基站才会触发终端进入更大带宽(例如 100 MHz)接收数据。

在子帧长度方面,4G 系统中使用的是一个子帧包含 14 个 OFDM 符号的设计。在 5G 系统中,出于在中低频进行超低时延传输以及在毫米波频段有效利用时域碎片化资源的动机,引入了

更短的子帧设计:一个子帧可包含 14/7/4/2 个 OFDM 符号(在 LTE 中也进行了时延缩短的研究并引入了短帧,但是目前来看商用前景不容乐观)。短帧不单单是满足国际电信联盟 1 ms 用户面时延需求所必需的技术手段,而且在后续车联网以及工业互联网的应用中也是必不可少的技术手段之一。

在交叉时隙干扰方面,上下行交叉时隙干扰以及大气波导引起的远端基站干扰都是 TDD 系统的痛点。由于 5G 商用系统几乎都使用 TDD 频段,上述两个问题也引起了广泛的关注。在 5G 标准的第二个版本中,正在针对这两种干扰进行标准化信令设计,希望在 5G 系统中能够更好地解决这两种干扰,从而使系统资源调度有更高的灵活性,网络部署可以更加多样化,最终达到提升系统频谱效率和成本效率的目的。

除了基础参数集和上面提到的技术(短帧、初始接入带宽)以外,5G 系统中还包含了多项灵活传输和低时延传输的特性,包括前向兼容、LTE-NR 共存、灵活时序、更窄保护带、上行免调度、自包含子帧、非激活态等,限于篇幅不再一一详述。

3.3 新频段(多频段协同)

多频段协同主要包含 3 个方面,首先是高中低频段联合组网,其次是 5G 与 4G 频段之间的交互,即独立与非独立的组网方式,最后是使用多频段联合传输,确保上行覆盖。

首先,从整体生态系统来看,不同于 4G 系统单频组网的情况,5G 的生态系统覆盖了从几百兆赫兹到几十吉赫兹的载频范围,这些载频都有各自不同的特性,适用于不同的场景。一般来说,5G 频段大致可以划分为 3 个不同的范围。

- 低频段(一般为 2.5 GHz 以下,例如 900 MHz/1 800 MHz 频段):此频段的网络部署与 4G 的 FDD 部署类似;带宽较小(20 MHz),天线数目较少(2~4 通道),其主要功能在于提供连续覆盖、保证深度覆盖、提供移动性管理以及控制面切换等。



- 中频段（一般为 2.5~7 GHz，例如 2.6 GHz/3.5 GHz/4.9 GHz 频段）：此频段的网络部署与 4G 的 TDD 部署类似：带宽较大（如 100~200 MHz），天线数目较多（8~64 通道），其主要功能在于提供基础覆盖，保证全网平均性能。
- 高频段（一般指 7 GHz 以上的频段，如 24 GHz/37 GHz 频段）：此频段的网络部署为全新的部署形态，带宽极大（通常为 GHz 的带宽），天线数目极多（例如 1 024 天线阵列，通过模拟移相器方式降低通道数量），其主要部署在热点/室内区域，确保单点区域极致体验性能。

5G 的组网需要考虑以上 3 种频段的不同特性，通过混合组网的形式尽可能提高用户体验与保证部署效率。

其次，不同于以往 4G 只有单独组网的一种方案，在 5G 中引入了两种不同的组网方式，即独立组网与非独立组网的模式，如图 6 所示。在独立组网模式下，用户驻留在 5G 载波上，只有当进入无 5G 覆盖的区域时，才会回落到 4G 载波上，在 5G 与 4G 之间主要通过核心网交互，属于 4G/5G 松耦合的组网方式。在非独立组网模式下，用户驻留在 4G 载波上，即在空闲态下从 4G 载波接收控制面信令，当用户数据到达时，通过 4G 载波为用户配置可用的 5G 载波并进行相应的数据传输，属于 4G/5G 紧耦合的组网方式。

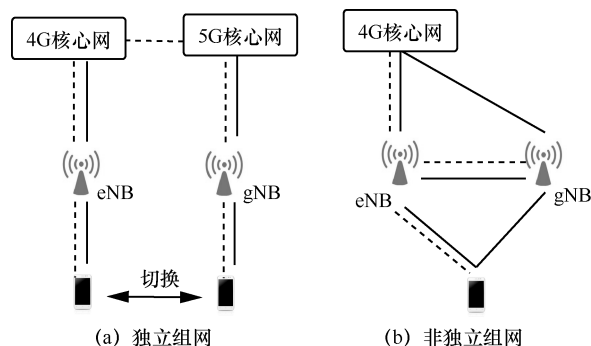


图 6 独立组网与非独立组网

独立与非独立组网方式各有优缺点。独立组网可以更好地支持网络切片，而且可以使用一些 5G 特有的控制面设计，例如非激活态、SDAP 等，但是独立组网需求全新的 5G 核心网，部署速度较慢，语音操作较为复杂，与当前需要争夺 5G 制高点，快速部署 5G 商用网络的步调略显不符。非独立组网的标准、无线、终端的产业成熟度均较好，部署快速，但是难以支持网络切片等先进特性，控制面时延等指标也有待产品和标准进一步地优化。因此目前的策略在于先期进行非独立组网的商业部署，并以独立组网为目标进行逐步演进，此外也可考虑将独立组网应用于工业互联网等强烈需求网络切片的场景中。

最后，多频段协同还包括多频段联合上行传输，其主要原因在于在大带宽系统中，由于终端发送功率有限，5G 系统的上行边缘速率与 4G 系统类似。考虑到 5G 的上行平均速率、下行平均速率、下行边缘速率均大幅度提高，上行边缘速率如果不进行任何增强，可能会成为整个系统性能的瓶颈与短板。按最新的仿真结果，在小区边缘，上下行速率的差异可能达到 100:1，是一个严重的上下行不对称的网络性能。

5G 中解决上行边缘速率的方法主要是使用更低频率的载波来进行上行传输。在非独立组网情况下，天然的可以使用 4G 载波增强 5G 更高频段的上行性能，通过上行分流的技术即可将 4G 和 5G 的上行载波联合进行上行数据传输。在独立组网情况下，情况较为复杂。一种方法是增强终端，如加入高功率和双发等特性，但是不可避免地会增加终端成本和延迟终端上市时间；另一种方法是类似于非独立组网的模式，从 4G 载波中截取一段来进行 5G 的上行传输，在标准中称为上行增补载波。需要注意的是，这种方法并不是 4G 系统完全不能使用相应的频段，基站仍然可以通过时分或频分的方式来动态或者半静态地为 5G 和 4G 分配上行资源，亦即上行共享的概念。

3.4 新天线（大规模天线）

大规模天线是 5G 系统的一个重要特征。相比于 4G 系统 2~8 通道的设计，在 5G 中 16~64 通道的设备在中频段成为主流，如图 7 所示。在毫米波频段，更多的天线阵子是主流设计，考虑到成本问题，毫米波频段还需要使用移相等模拟器件降低通道数，达到控制成本的目的。

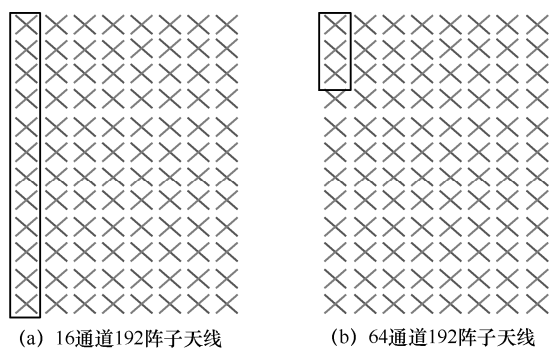


图 7 5G 天线形态（16/64 通道）

在 5G 的系统设计中，针对大规模天线进行了多项优化。第一项是初始接入信道成形：在 4G 中已经对数据信道进行波束成形，可以增强其覆盖，但是由于需要兼顾存量终端的原因，在 4G 系统中无法对初始接入信道（如同步信号、系统消息广播等）进行成形，初始接入信道的覆盖弱于数据信道，从而使得整个系统的覆盖并没有真正地增强。在 5G 系统中由于没有后向兼容的限制，引入了多波束初始接入的功能，使得初始接入

和数据传输能够达到相对平衡的覆盖范围，如图 8 所示。从另一方面来讲，引入多波束接入也一定程度上增加了系统的复杂度，包括切换与测量时具体测量哪些波束等问题，也都在标准中进行了详细的定义。

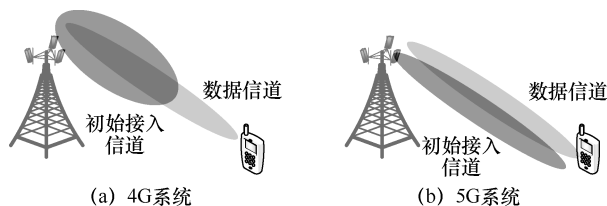


图 8 初始接入信道成形

5G 针对大规模天线进行的第二项优化是 MIMO 的混合操作模式。在 4G 系统中有两种 MIMO 的操作模式，第一种是基于信道互易性的成形，即通过测量上行参考信号得到信道信息并成形，第二种是基于码本的成形，即通过终端反馈得到信道信息并成形，这两种方法各有优缺点，见表 5。

在 5G 系统中，主要使用的 MIMO 操作模式是上述两种方法的混合，即首先通过信道互易性将高维信道（如 64/16 通道）降为低维信道（如两通道），然后通过码本进行反馈，如图 9 所示。此方法可有效综合 4G 两种 MIMO 操作模式的长处并避免其短处。此方法也是目前 5G 规模试验主要采用的 MIMO 操作模式。

表 5 5G MIMO 操作模式与 4G MIMO 的比较

指标	4G 码本操作	4G 信道互易性	5G 混合操作性能
基站天线形态	敏感×	不敏感✓	不敏感✓
反馈精度	较低×	高✓	高✓
多用户 MIMO	不友好×	友好✓	友好✓
终端计算复杂度	高×	低✓	低✓
终端射频复杂度（SRS 轮发）	单发✓	轮发×	单发✓
只能获得部分信道信息	否✓	是×	否✓

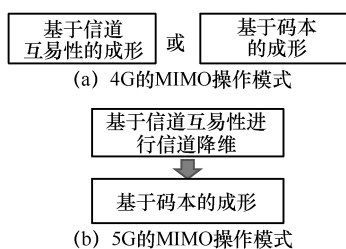


图9 5G的增强MIMO操作模式

5G 为大规模天线做的第三项优化是参考信号的全新设计。4G 系统中最主要的参考信号是公共参考信号 (CRS)，其承担了大部分的参考信号的系统功能，包括精同步、解调、反馈和测量等，是 4G 系统的核心设计。但是，随着天线数目的增长以及异构网络拓扑的引入，CRS 的缺陷也逐渐显现，包括多天线下开销、邻小区干扰、前向兼容困难等。有鉴于此，在 5G 系统设计之初就有意去除了 CRS，其承载的功能被分配到多个其他参考信号中，包括跟踪参考信号、解调参考信号和信道信息反馈参考信号等。通过多个独立功能的参考信号灵活组合与配置，可以达到开销和性能的最优平衡。

除了初始信道成形、混合操作模式、全新参考信号之外，5G 还为大规模天线引入了单一发送模式、上行非码本 MIMO、终端四收等特性以及在毫米波频段应用的波束管理、波束对应性、相位噪声消除等重大技术，限于篇幅不再一一介绍。

4 结束语

从第 2 节和第 3 节的讨论中，可以明显看到 5G 主要是由需求驱动而不是由技术驱动的标准。第 2 节讨论了 MIMO-OFDM 架构是如何满足 5G 的极致性能指标的，第 3 节则总结了 5G 的设计相比 4G 有哪些创新点，包括新架构、新设计、新频段、新天线的具体内容，可以帮助具有一定 LTE 技术背景的读者快速理解 5G 新空口设计的基本思路以及基本性能。

需要注意的是，随着频段不断升高和天线数目不断增加，MIMO-OFDM 架构在 5G 讨论的末期已

经出现了“力不从心”的迹象。例如，在高于 50 GHz 的频段，由于相位噪声和峰均比的问题，新的波形（如单载波）可能会取代 OFDM 的位置。再比如，当通道数多于 64 的时候，5G 已经引入了模拟波束成形以降低成本。如果后续天线数目继续增加，可能使用透镜天线是更为合适的选择，而相关的技术与标准也需要继续深入讨论。因此，虽然在 5G 阶段，MIMO-OFDM 是最合适的选择，但是在更下一代的通信标准中（如 6G），通信学术界和产业界还是应当继续大胆发掘革命性的技术，以更好地为不断增长的用户需求提供服务。

参考文献：

- [1] ITU M. 2083. IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond [EB]. 2015.
- [2] 3GPP. Study on new radio (NR) access technology: TR 38.912, v 1.0.0[S]. 2017.
- [3] LG Electronics. Revised WID on 5G V2X with NR sidelink: RP-190984[R]. 2019.
- [4] Nokia. New SI proposal: study on channel modeling for indoor industrial scenarios: RP-182138[R]. 2018.
- [5] 3GPP. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA): TR 25.913 v9.0.0[S]. 2009.
- [6] Intel. Peak data rate and peak spectral efficiency evaluations for NR: R1-1808709[R]. 2018.
- [7] Ericsson. IMT-2020 self-evaluation, UP latency in NR: R1-1809277[R]. 2018.
- [8] Ericsson. IMT-2020 self-evaluation, CP latency in NR: R1-180927[R]. 2018.
- [9] 3GPP. Cellular system support for ultra low complexity and low throughput internet of things: TR 45.820 v1.3.1[R]. 2015.
- [10] Ericsson. IMT-2020 self-evaluation: mMTC full buffer connection density: R1-1809262[R]. 2018.

[作者简介]



童辉（1977—），男，中国移动通信有限公司项目经理、高级工程师，主要研究方向为 4G/5G 物理层，尤其是大规模天线方向的技术研究、专利申请、标准化以及规模试验等。