



2016 年 6 月 13 日

Xilinx 解决方案和实现技术助力新一代无线系统成功迈向 5G

作者：Sassan Ahmadi 博士

赛灵思预见的是一种基于开放式标准接口并拥有边缘计算能力的虚拟化、可编程、高度灵活的 5G 网络。赛灵思解决方案及产品在准 5G 和 5G 技术的实现、试用和商业化进程中发挥着重要作用，有助于实现和推动网络设计和部署的灵活性。

摘要

第五代无线系统将引领极具革命性的移动通信系统，能够随时随地提供无所不在、吞吐量极高、低时延的用户体验。5G 系统明显增加的系统容量和实时响应能力将支持众多新业务，为用户提供真正身临其境的丰富体验。要实现任务关键机器通信或物联网（IoT），要求大量设备之间必须提供可靠连接，而这只有通过 5G 系统才能得到满足。为此，赛灵思正在发挥着重要作用，努力提供最先进的全可编程 FPGA 平台和 SoC，这不仅能加速 5G 概念验证和技术试验的开发进程，而且还有助于用于 5G 网络的大规模商用无线产品的尽早实现。

引言

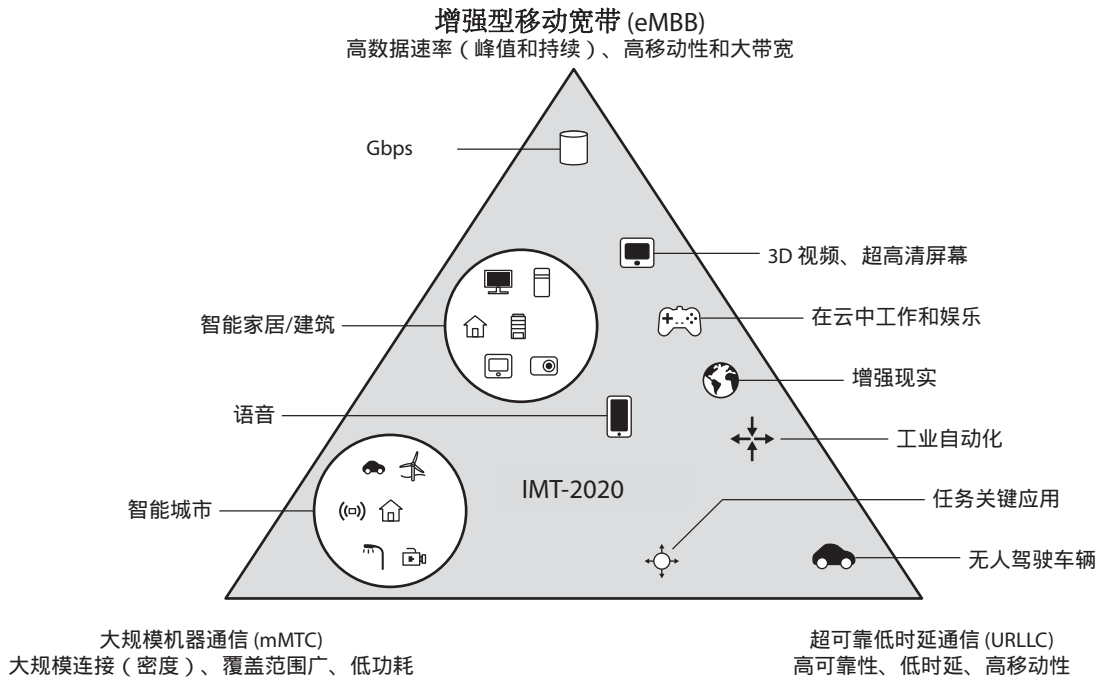
第五代 (5G) 移动宽带无线网络有望满足现有和 2020 年及以后严格的系统与业务要求。5G 系统预计是一种由人和机器组成的安全、可靠且完全移动的庞大联网生态系统, 可实现更有效的连接, 更高的工业生产力、自动化与可持续性, 以及更完善的医疗保健。对移动联网社会的需求已体现为连接和流量密度的大幅增长、异构网络的密集化以及多种多样新型用例和业务模式。由此, 有必要将 5G 系统 / 网络性能发挥到极致, 以确保通过虚拟化和软件定义网络来实现更大网络容量、更高用户吞吐量、更好的频谱利用率、更高带宽、更低时延、更低功耗、更高可靠性, 以及更高连接密度和更强的移动性。

在拓展移动网络性能极限的同时, 5G 预计还会包含内在的灵活性和可扩展性, 以优化网络使用与业务, 从而适应多种用例以及业务与合作关系模式。为了以智能、低成本方式满足各种用例需求, 5G 架构将包含能够按需进行部署、配置和扩展的模块化网络功能。

赛灵思一直是用于数字无线电前端、连接、基带加速、前传 / 回传及数据包处理功能的无线 / 有线基础设施全可编程半导体组件的主要提供商。赛灵思半导体产品的可编程性、性能、灵活性以及可扩展性是使这些器件成为助力这些应用以最快速度上市的最佳解决方案的关键价值所在。为此, 赛灵思正在发挥着重要的作用, 努力提供最先进的全可编程组件, 这不仅能加速 5G 概念验证和技术试验的开发进程, 而且还可力促无线网络及产品的大规模商用部署。

5G 愿景

通过详细了解 5G 这一大趋势的三大使用模式, 即可充分理解 5G 的范畴: 高吞吐量移动宽带 (eMBB)、超可靠低时延通信 (URLLC)、低能耗大规模机器通信 (mMTC) [参考资料 1]。高吞吐量移动宽带用例将以 LTE 技术发展演进和特性增强为基础。移动宽带用例的演进性质意味着内在的向后兼容性, 但这种情况仅限于低于 6GHz 的 RF 频谱。任何高于 6GHz 的移动宽带部署预计都会使用新的基带和无线电技术, 以提升频谱效率、吞吐量, 并降低时延。任务关键机器类型通信和大规模机器通信用例均发生了革命性变化。大规模机器通信用例的技术和设计选项预计不会受到兼容老旧系统 (即后向兼容性) 的阻碍 (见图 1)。



WP476_01_050916

图 1: 5G 用例和要求类别 (来源: ITU-R [参考资料 2])

如图 1 所示, 峰值和平均数据速率以及传输延迟是高吞吐量移动宽带体验的主要性能指标。互动游戏、增强型/虚拟现实和沉浸式娱乐都是比较值得注意的新兴消费移动宽带业务, 有望带来新的商机和体验。5G 预计随时随地能够提供超过 10Gb/s 的峰值数据速率 (平均数据率约为 100Mb/s)。这将要求到 2020 年网络容量增大 1000 倍以上。为满足这一容量剧增要求, 网络运营商正准备利用新频谱、提升频谱效率、部署超高密度网络, 三管齐下。

低时延机器类型通信的实例包括工业物联网 (IoT)、汽车、智能电网、交通安全、应急响应服务等。如今, 部分此类应用正在使用成本高昂且难以维护和扩展的专有通信技术。5G 的目标是引入可靠、弹性、低时延且安全性高的通信技术, 以加速亟需的向标准解决方案的过渡。触觉互联网 (Tactile Internet) 是此用例有趣的一个方面, 有望带来新的业务。

要将 6GHz 以上的射频频谱用于移动宽带、低时延任务关键机器类型通信和低能耗大规模机器通信, 要求开发新的无线电接口和接入技术。但是 5G 并非只是开发新的无线电接口那么简单。相反, 5G 有望运行于高度异构的环境中, 该环境存在多种类型的无线电接入技术、多层网络、设备和用户交互等。在这样的环境中, 对 5G 而言, 一项根本要求就是能够跨时空实现无缝、一致性用户体验。新的业务模式和经济激励因素, 加上其带来的成本效益、能效和运营效率的根本变化, 有望让 5G 具有可行性和可持续性。5G 还能通过定义并开放可加强当今总体服务交付的功能, 为客户和合作伙伴创造价值。要实现 5G 用例和业务模式, 需要为移动宽带分配更多频谱和灵活的频谱管理功能。

5G 网络将采用一组新的频带来增强现有无线频谱, 从而实现更高带宽并显著增加容量。这样的大规模连接和巨大容量将需要更多基站或接入节点。因此, 将采用小蜂窝和大容量 C-RAN 或 V-RAN 架构为数量巨大的远端射频单元服务。5G 网络云边缘的内容缓冲与处理能帮助延迟敏感应用克服网络传输瓶颈。

5G 免不了要求将部分低于 6GHz 的频谱改作他用——与这些新技术结合使用。现有蜂窝频段通过分配高于 6GHz 的新频谱，得到显著增强，从而可提供更宽的工作带宽。为进一步提升峰值数据速率，将使用载波聚合技术整合并非处于相同频段中的频段。核心频带将提供高达 100 或 200MHz 的连续带宽，新的延伸频段将提供高达 2GHz 的总带宽。

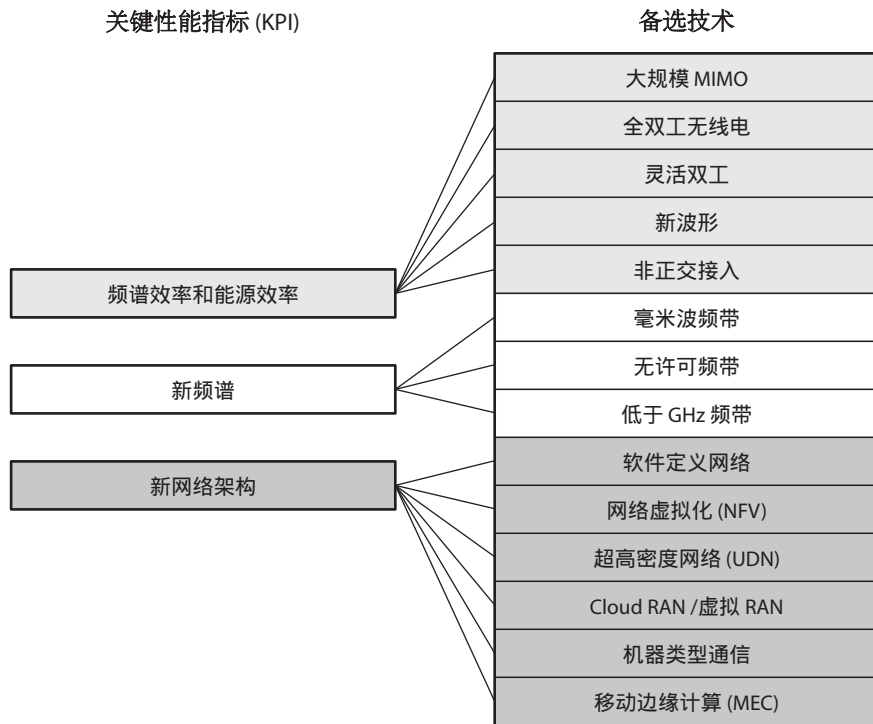
除支持既定的移动宽带使用模式的演进，5G 还支持适用于各种应用的大量新兴用例，这些应用具有多样化性能属性，例如从延迟容忍应用到超低时延应用，从列车 / 飞机中的高速移动情景到家庭或办公室中的低速移动 / 静止情景，以及从追求最佳性能的应用到医疗保健和公共安全等领域的超可靠应用。此外，内容和信息将通过智能电话和可穿戴产品等各种设备在异构环境中实现交付。

高级驾驶员辅助系统 (ADAS) 和无人驾驶车辆是汽车领域的新兴趋势。两者相结合将带来一系列好处，包括提高安全性、降低碰撞风险、减少道路拥塞、提高燃油经济性、提高驾驶员工作效率等。支持高速低时延车辆间以及车辆与基础设施间通信的 5G 无线技术是 ADAS 和无人驾驶车辆的关键实现技术。另外，汽车行业正需要更加丰富的信息娱乐选项，这会给无线网络带来更多流量瓶颈。

同过去几代网络一样，无线接入技术的改进、演进和变革将继续作为重中之重。但是，要实现能服务于多个垂直市场和多元化消费市场的综合通信平台的这一目标，网络架构、功能、可编程性，以及 API 对于 5G 而言同等重要。为方便电信运营商为每种最终用户应用或业务开发出性能和服务水平协议得到保障的网络切片，网络功能虚拟化将成为核心组件。这些网络切片需要云和边缘计算组件来应对不断变动的性能和时延要求。每个网络切片都将依赖增强型 LTE 技术和/或新的无线接入技术。

正在进行的 5G 研究与标准制定已经揭示出一系列关键技术，这些预计将有助于满足尖端系统要求的关键技术包括：

- **毫米波频谱：**使用更高的 RF 频谱（高达 100GHz）可允许使用更高带宽（高达 2GHz），从而实现更高的峰值数据速率和系统容量。
- **新波形和多址接入方案：**基于 OFDM 的 LTE 空中接口可能不适用于部分用例，因此，正在研究一些新的空接口备选方案。支持自适应数字学的 OFDM 将允许根据各种用例、频谱和带宽，在不影响与传统 LTE 系统后向兼容性的情况下对帧结构和无线电资源规划进行配置。
- **大规模 MIMO：**将多用户 MIMO 概念扩展运用到基站上的数百根天线，是通过实现波束成形数据传输和干扰管理显著提升用户吞吐量和网络容量的极具前景的解决方案。在极高频率下发生的路径损耗的明显增加，必须用更高的天线增益进行补偿，这可通过增加基站的天线数量来实现。此外，还可运用自适应波束成形算法并借助有源天线技术来实现。
- **器件间 (D2D) 通信：**作为一种满足公共安全要求的既有 LTE 用例，D2D 通信可帮助新型接近应用和专用网格网络实现低时延。
- **云无线电接入网和核心网络的网络虚拟化：**旨在将当今专用硬件上的网络功能当作核心网络中通用硬件上的虚拟软件功能运行。通过将基站划分为远端射频单元和基带处理单元（通过光纤链路、高速以太网线缆和无线前传进行连接），同时在虚拟化环境中池化基带功能以处理大量射频单元，并按核心网络功能组成不同的网络切片，就可以把该技术扩展用于无线网络。
- **对控制层面和用户层面进行分离和 / 或对下行链路和上行链路控制 / 数据路径进行解耦，**有可能在宏观层面上控制所有用户设备，而用户数据通过异构网络中的一个或多个小型蜂窝独立执行发送或接收。
- **最佳无线电资源管理：**考虑到存在大量可能的极小型蜂窝和密集的用户分布，需要对无线电资源管理进行优化，从而需要能够在不协调情景得以执行的更高效的调度策略。见 [图 2](#)。



WP476_02_042616

图 2: 将 5G 备选技术映射到 KPI [参考资料 3]

5G 系统和业务需求

系统与业务需求结合 5G 系统关键性能指标 (KPI) 将对未来网络的各项功能进行定义, 并为 5G 技术开发提供框架。用户体验取决于应用类型、网络能力和覆盖质量等, 这几个方面将转化为多组 KPI 和特定系统要求。如图 3 所示, 超过 10Gb/s 的峰值数据速率是 5G 网络的一个基础 KPI, 但是, 对于随时随地接入互联网而言, 50-100Mb/s 的最低保证用户吞吐量可能更为重要。此外, 5G 生态系统必须确保高数据速率在从 0 速度 (静止) 到 500km/h (高速移动) 范围内的各种移动场景下能够可持续。除了数据速率和移动性, 流量密度和连接密度也必须包括在容量要求中。为保证对“触觉互联网”应用、任务关键应用, 以及交互式应用提供支持, 要求端到端时延为毫秒级, 无线电链路时延小于 1 毫秒。

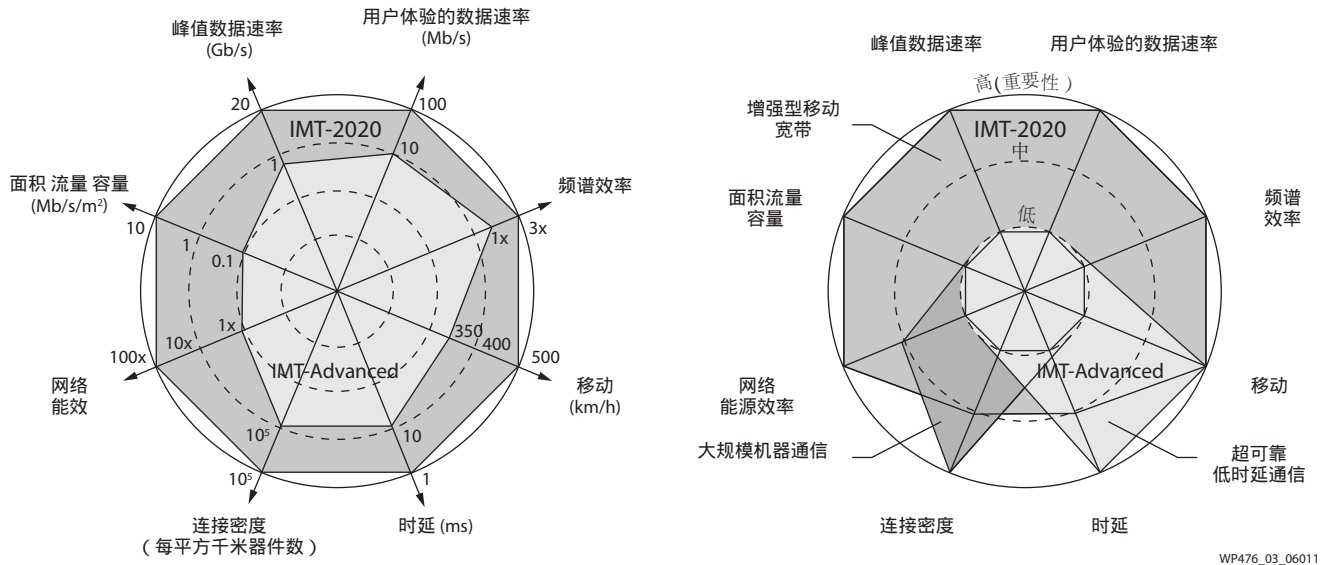


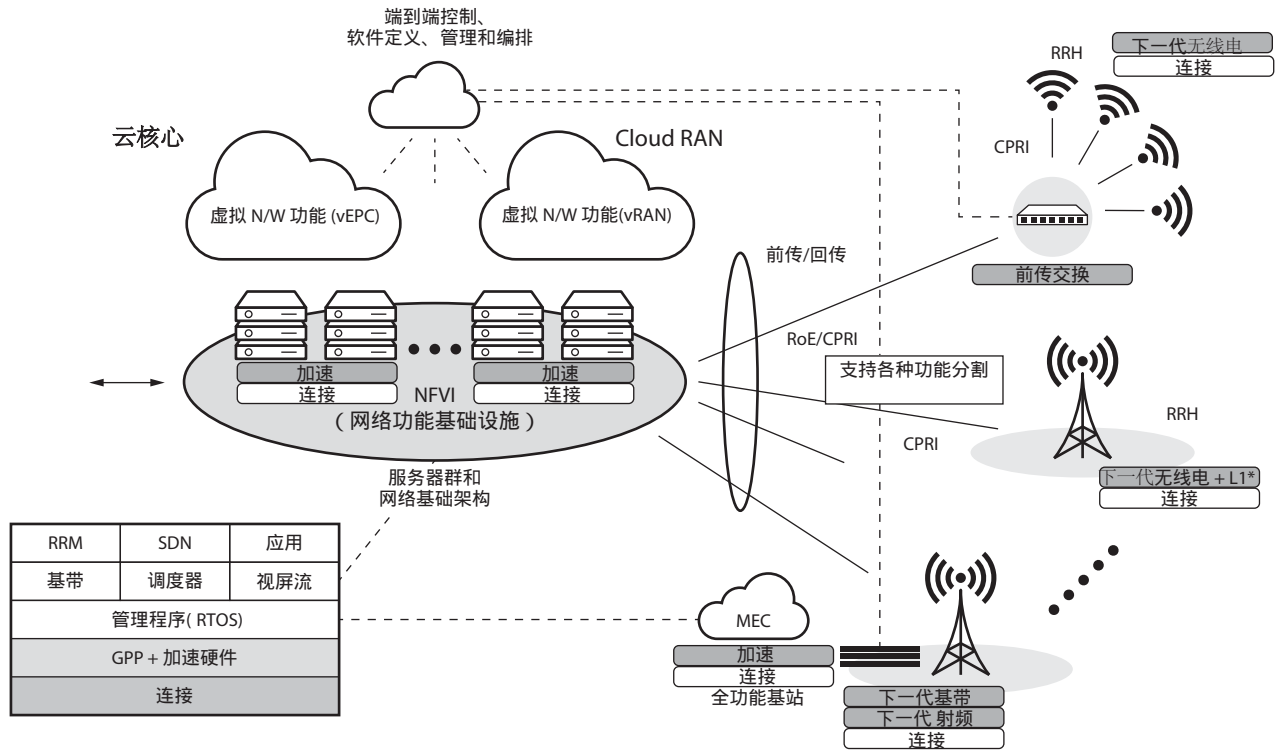
图 3: 从 IMT-Advanced 到 IMT-2020 的关键功能增强 (来源: ITU-R [参考资料 2])

5G 用例提出的要求极为多元化且往往具有挑战性。在这种情况下, 使用单一解决方案要同时满足所有要求可能会导致过度设计、过于复杂, 以及过高的实施与部署成本。尽管如此, 部分应用和用例可能仍需要同时由同一网络提供, 这就需要 5G 网络具有高度的灵活性和可扩展性。为体现出它们的应用依赖性, 5G 要求根据用例情景来设定。针对每个门类, 用一组要求代表该门类中的极端用例。由此, 满足一个类别的要求即可满足该类别中所有用例的要求。后续章节将对 5G 无线接入网络要求的各个方面以及在考虑中的备选技术进行介绍。

网络架构

网络架构不仅在实现新的 5G 业务和适应指数级流量增长方面发挥着重要的作用, 在以灵活的方式支持多种无线电接入技术 (RAT) 方面也发挥着重要作用。目前的移动核心网络是以紧密耦合的软硬件平台的方式实现的。网络监控、IP 地址分配、QoS、安全, 以及计费等诸多 EPC 网络功能都由专门的实体来执行。扩大网络容量的成本非常高, 因为这往往需要安装昂贵的设备。为解决成本高昂的问题, 必须使用基于 SDN 的虚拟化移动核心网络基础架构。

基于 C-RAN/V-RAN、SDN 和 NFV 概念的 5G 移动网络架构以及赛灵思的重点领域见图 4。在此框架中, 控制层面与用户层面解耦合, 控制层面逻辑上集中在网络控制器中, 而用户层面则在位置上更加贴近用户 (移动边缘计算)。网络功能与专用硬件解耦合, 并实现在能运行于虚拟机上的软件中 (该虚拟机实例化在通用计算平台上)。网络运营商能够灵活地对处于不同位置的网络资源进行选择, 这意味着网络服务和资源能够按需配置。在核心网络侧, 网络功能被虚拟化和模块化, 从而能够方便地对新业务进行开发和测试。从而能够方便地对新业务进行开发和测试。在无线接入侧, 部分控制功能能够逻辑上集中在无线电控制器中, 以便进行联合优化, 进而改善客户体验。此外, 使用开放网络接口可以通过 API 为各种应用提供网络的简化模型, 让新业务和新应用的构思更加顺畅。



WP476_04_042616

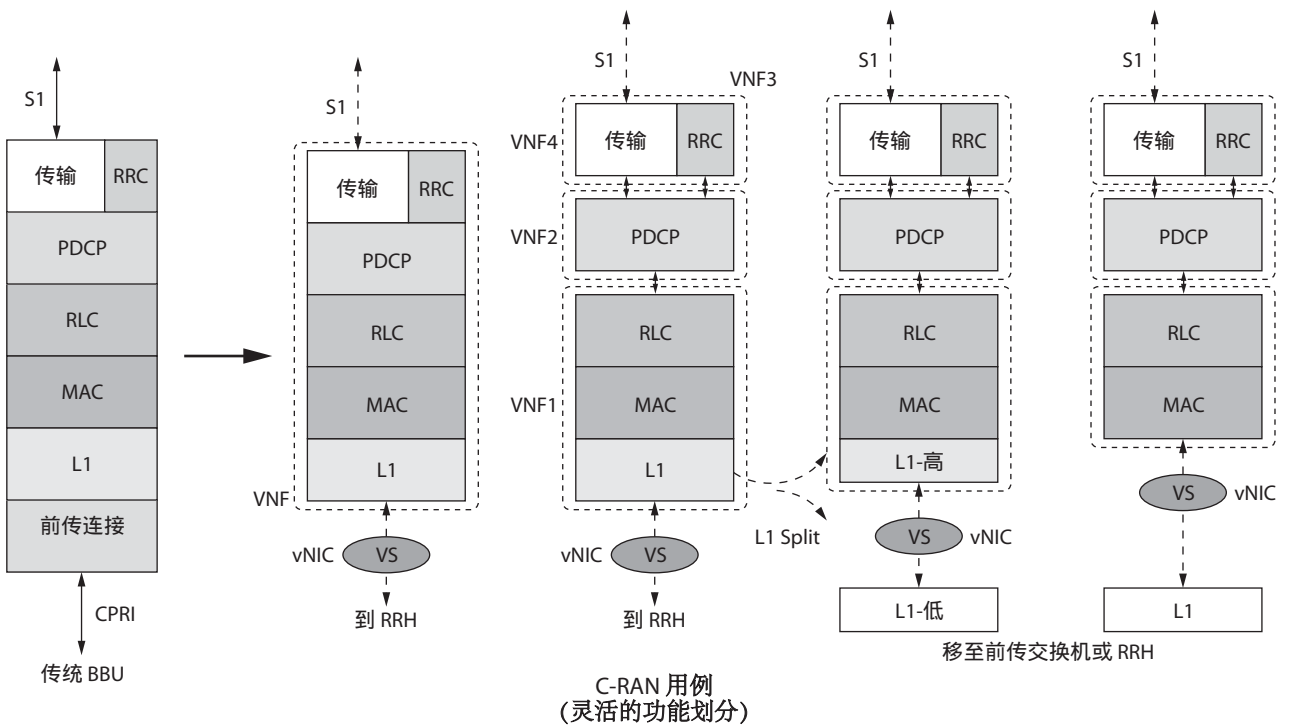
图 4: 5G 网络架构和赛灵思价值主张

尽管 5G 网络架构中采用 SDN 和 NFV 技术能带来众多颇具吸引力的优势，真正实现这一理念相当有难度，因为还无法证实标准硬件能否满足蜂窝网络的性能和可靠性要求。实现控制器和转发硬件的接口和协议的标准化并确保互操作性需要开展大量的工作。此外，SDN 和 NFV 带来的潜在安全威胁和解决方案也需要进行综合而全面的研究。

网络功能虚拟化与软件定义网络概念的结合，可显著简化核心网和接入网实体的实现，实现低成本的网络部署、运营和管理。在软件定义网络中，通过对计算、存储和无线资源进行虚拟化和集中化管理，可实现动态、以用户为中心，并满足各项服务要求的资源管理。软件定义网络预计将以打造运营商级的云平台，以实现具备开放接口网络功能和网络共享功能的网络即服务。这样就有可能实现网络灵活性和可扩展性，同时也为用户提供多种服务和始终如一的品质。在接入网中，能够实现多种网络架构，从高容量宏基站到低功耗低成本的毫微微蜂窝，或从超高密度城域网到农村广域网，无所不包。

赛灵思 All Programmable 技术能实现多种类型的 SDN/NFV 应用，包括侵入检测、虚拟交换 / 路由、流量工程以及即时服务配置。赛灵思支持优化的工作负载加速、数据流的有效管理与路由、各种通信协议，以及按需提供的可编程数据层加速。赛灵思提供的灵活、标准化解决方案可将软件可编程数据层面、VNF 工作负载优化、高性能连接与 SDN/NFV 网络所需的安全性完美结合在一起。为支持 SDN，赛灵思的 SDNet™ 软件定义环境用于构建可编程数据层解决方案，以满足该网络独特性能和时延要求。为支持虚拟化和软件定义联网，赛灵思的 SDAccel™ 软件定义环境用于提升虚拟化网络功能的性能。

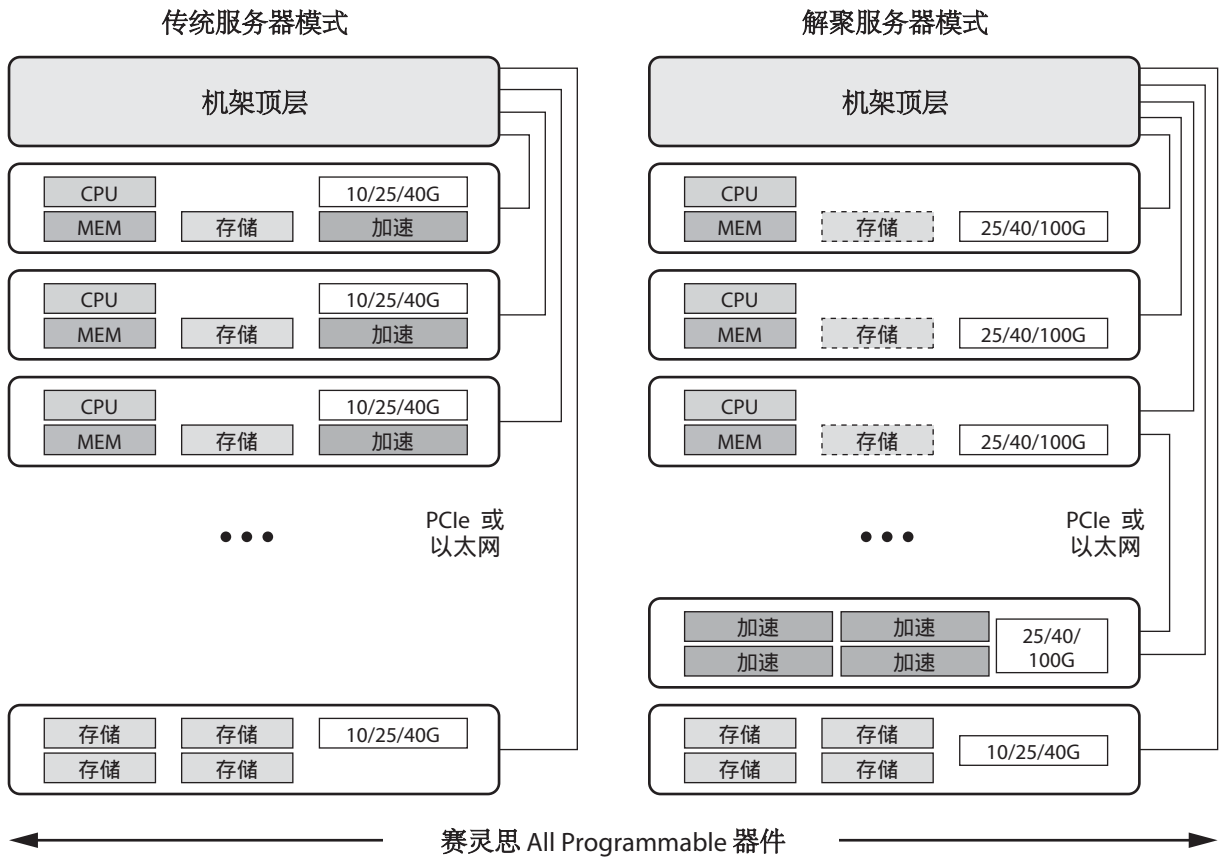
如图 5 所示，当从传统云无线电接入网（C-RAN）模式（即所有基带功能都在定制硬件上运行的基带单元中执行）迁移到虚拟化无线接入网（即 RAN 功能成为在通用硬件顶层运行的虚拟机）可以定义各种不同形式的虚拟机，并且根据部署场景方案，RAN 功能可分布在基带处理单元（BBU）和远程射频单元（RRH）上。为确保高计算强度实时功能可在不降低性能的情况下执行，需要使用硬件加速器。硬件加速发挥关键作用的领域之一是网络接口控制器（NIC）和虚拟交换机（VS）。虽然基于 ASIC 和基于 FPGA 的网络接口控制器在实际中都可使用，要支持所需特性，基于 ASIC 的网络接口控制器需经预先设计；而基于 FPGA 的网络接口控制器则不必支持全特性集。使用部分重配置功能，赛灵思基于 FPGA 的网络接口控制器通过随时加载不同的位图像，能支持不同的特性。



WP476_05_051616

图 5: C-RAN 和基带网络功能虚拟化

图 6 所示的是两种替代数据中心（和 C-RAN）服务器模型。传统数据中心拥有配备一定数量服务器的相对静态的计算基础设施，每台服务器有预先确定数量的 CPU 和固定数量的内存、存储和硬件加速资源。但是由于网络负载和用户流量的动态性质以及为确保有充足的资源可用于满足峰值需求，一般会超量配置服务器，其中部分服务器可在非峰值负载和流量条件下未充分利用。分散数据中心（云）资源组件可为运营商提供灵活性，降低资本支出和运营支出，实现资源按需配置与供给，同时确保最佳利用率。赛灵思 FPGA 和 MPSoC 可针对 NFV 业务提供按需硬件加速和快速连接，同时也降低了总成本及功耗。运行时间可编程解决方案不仅可让网络运营商实现差异化服务，而且还能提升服务，使其具有显著改善的性能和确定性 QoS。使用赛灵思部分重配置技术还可进一步地缩小 FPGA 的大小。赛灵思提供的 SmartNIC 解决方案为虚拟 C-RAN 架构中的虚拟交换机提供按需加速和快速网络连接，从而为虚拟机实现最大吞吐量和可移植性。



WP476_06_050616

图 6: 赛灵思用于移动通信云和数据中心的 SmartNIC 和可编程加速解决方案

作为一种极具前景的架构，C-RAN 在将虚拟化、集中化和协调技术相结合的同时，又将控制层面和用户层面相分离。在 C-RAN 架构中，核心网和接入网中的网络功能能够贴近放置，甚至可以同处一个平台上，这不仅有助于降低时延，同时还可提升 QoE。一种名为移动边缘计算（MEC）架构的替代性方法将计算资源布局在靠近基站和移动用户的接入网的边缘。MEC 有潜力提供超低时延、高带宽环境，为位于移动网络边缘的无线网络提供实时接入。要实现 MEC 架构，在不同部署场景中需要应对诸多挑战，诸如移动支持、安全性、资源管理等。如图 4 所示，硬件加速是赛灵思在移动边缘计算领域中提供的技能之一。此外，赛灵思还可为 C-RAN 回传 / 前传连接、远端射频单元及基带单元中的数字射频基带处理提供极为高效的解决方案。RAN 虚拟化使众多拥有相对较小虚拟机的租户能够高效共享计算、存储和网络资源。

5G 网络要求必须具备下列因素：

1. 基于 SDN 和 NFV 的网络架构的可编程性和可扩展性
2. 能够根据服务要求配置合适的网络切片
3. 与非 3GPP 技术（例如 Wi-Fi）并存和集成
4. 新业务实现技术，包括 eMBB、mMTC 和 URLLC 用例类别
5. 优化频谱利用效率、能耗，以及实现与部署成本

5G 核心网络可使用虚拟化功能并支持在仅需最小变更乃至无需变更网络硬件的情况下，有效、低成本地进行网络实体重配置、升级和编排。控制层面和用户层面必须与它们之间的开放接口解耦合。5G 核心网络功能预计将高度模块化和虚拟化。各项功能由相关 API 调用，按需构成不同的网络切片。执行类似任务的网络功能的类型应尽量减少，必须在灵活性和复杂性之间进行权衡取舍。由一组专用虚拟化网络实体为选定的用例实现网络切片，这些网络切片共享基础设施资源。

为了以低成本方式支持多样化的用例和要求，系统设计方法应告别针对移动宽带优化的传统单芯片设计。因此需要重新考虑控制 / 数据承载、APN、网关、隧道和移动 IP 领域的设计准则。此外，存储 UE 情景的 UE 状态机和实体应重新检查和重新设计，并且应尽量减少强制功能。

为实现用于多种类型的新应用和用例的大规模连接，5G 无线电接入网的功能必须延伸并超越以往数代蜂窝网络。这些功能的实例包括极高峰数据率和用户吞吐量、极低时延、超高可靠性以及容纳和为大量互联设备提供服务的能力。通过 3GPP LTE RAN 的持续演进，再结合新的无线电接入技术的开发就可以实现这些目标。关键技术组件包括更高频段的扩展频带、先进多天线传输方案、极高效低开销无线电接入设计、用户层面与控制层面分离、灵活频谱使用、补充性设备间通信以及回传 / 接入集成。

如果 RAN 功能的全部或部分能在云环境中执行，那么就能够以低成本方式在无线电接入技术充分发挥灵活性、智能化和可编程性的效用。这样还能根据需求实现资源共享和无线服务，以构成不同的网络切片，从而让无线电接入网和核心网都运行在集中化数据中心环境中，降低二者之间的互联时延。C-RAN 概念就是关于 RAN 功能的集中化、虚拟化和协调，以提供更出色的用户体验同时也加速新业务的市场上市速度。在 5G 网络中，根据传输网络的可用性和性能，分布式网络和 C-RAN 将共存于异构接入网的部署情景中。

提高数据速率和工作带宽将给前传传输网络带来压力，因在该网络中 CPRI 是最常用的专用光纤接口，要求对 RF 模块的连接进行更加严格的时延和抖动约束。可对带有不同的基带功能划分选项以太网承载前传 (Radio over Ethernet) 和下一代前传接口 (NGFI) 等更经济的传输解决方案加以利用，从而降低前传要求并且提高传输效率。例如，L1 或 L1 的一部分可集成到贴近天线的 RF 模块中，从而提高前传带宽效率达 10 倍。

虽然 LTE 将继续以向后兼容方式演进并将成为低于 6GHz 频带的 5G 无线接入解决方案的重要组成部分，在新频谱中开发不受向后兼容性制约的新无线电接入技术势在必行。对频谱资源有限的网络运营商，以向后兼容方式引入 5G 功能具有明显的优势。从长期来看，新的非向后兼容解决方案也可能扩展到低于 6GHz 的频谱。虽然总的 5G 无线接入网络将由包含 LTE 演进版本和新的 RAT 在内的各种不同组件构成，不同组件必须紧密集成，以提供更快的转换 / 移动性所需的紧密互联互通。这包括工作在较低频段下的 LTE 和工作在较高频带下的新技术之间的两种连接。还应该考虑用户层面的聚合或通过 LTE 及新的 RAT 联合向移动设备交付数据的可能性。

设计具有较小开销的无线接入网络是在未来无线网络中实现高效率的关键一环。超高效的空中接口设计的根本原则在于尽量减少与用户数据交付无直接关联的下行链路 / 上行链路传输。此类传输包括用于同步、系统获取和信道估计的信令以及用于播放各种不同类型的系统和控制信息的信令。对拥有大量的网络节点和高度变化的流量条件的高密度部署而言，超高效的设计特别重要，可通过在没有用户数据传输时使网络节点迅速进入低功耗状态。超高效的设计还能通过限制资源浪费和降低不必要传输的干扰，以提供更高的可实现数据率。

容量和用户吞吐量

5G eMBB 情景从容量和用户吞吐量方面是固定接入可行的替代方案。为高效支持流量需求的指数级增长，5G 网络必须有以相较现有网络更低的每比特成本交付用户数据。此外，为工作在较低功耗条件下，5G 系统必须让每比特功耗显著降低。5G 系统容量的另一个方面是与今天的系统相比，具有支持大量设备的能力。部分 5G 用例涉及部署海量无线连接传感器、传动装置和类似设备。每个设备一般都与极小的载荷关联，这意味着累积起来它们对总体流量的影响有限。但是大量设备面临的挑战之一是如何设计高效的信令协议。无线信令效率应予以增强，从而最大程度地降低无线资源和能耗。将每个单元域中活动连接的数量定义为性能指标可有助于客观地测出任何部署情景中能同时连接到特定网络设备的密度。

网络的用户吞吐量和时延属性分别定义的是用户在网络中体验到的典型平均数据率和往返延迟。最终这些属性的可实现值判定了网络可支持的应用类型。预计到 2020 年将出现有高数据率和低时延要求的新服务类别。研究显示，增强现实、互动游戏和触感互联网等新应用需要可实现的数据率与今天的数字相比增大 1000 倍，时延要降低达 10 倍。

低传输功耗、无规划要求的小型接入点可密集部署，从而实现超高密度网络。这种方法通过减小发送器和接收器之间的距离来提高频谱效率，同时也通过卸载用户流量，以在接入网中释放无线电资源，从而改善宏蜂窝服务。网络密集化是 2020 年及以后提高容量和数据率的一种途径。

能效

无线通信系统的传统设计原则倾向于最大化数据速率、容量和覆盖范围，这未必使解决方案的能效高。结果是网络中能耗增加，从而增大运营商的运营成本，最终提供到最终用户的服务也就变得更贵。此外，有些无线电通信策略加大终端侧的计算复杂性，对电池使用寿命带来不利影响。因此，能源使用效率必须成为除传统设计标准外的新的考虑因素。在设备或网络的数量以及它们的累积能耗在持续增加的时候，5G 无线接入设计必须提升能效。必须设定焦耳 / 比特或比特 / 焦耳标准，用以确定 5G 无线底层无线电接入技术的能效基准。

目前有两种方案可降低无线电链路上的能耗。小型蜂窝架构能缩短接入点与终端之间的距离，从而降低传输功耗。这种方法的主要挑战在于提供经济的回传解决方案并且最大限度地降低附加部署成本。第二种方法是采用大规模 MIMO，通过增加天线方向性和波束成型的方式将能量向用户聚集。这样就可使能量朝向指定用户，减少用户间干扰造成的能量浪费。大规模 MIMO 的挑战在于：由非视距传输 (NLOS) 的分散性所导致的能量耗散，限制可实现的方向性以及用户空分复用的复杂性。要实现每比特能耗最小化这个目标，需要从根本上改变无线系统设计，以显著提升功率和频谱使用效率。在器件实现方面，提高功率效率意味着重点关注低功耗硬件设计和高能效信号处理。

未来的网络架构和部署方案必须充分利用流量特性来提升频谱效率和能效。应该以高能效方式部署不同类型的基站和蜂窝尺寸，充分考虑其各自的功耗模式和不同功能，提供相应的覆盖率和容量。应利用流量随时间的变化来管理和分配无线电资源，例如高能效和高频谱效率的 RF 收发器配置以及大规模 MIMO 中的天线。

可用性和可靠性

超高可靠性的物联网应用所需的恢复力和鲁棒性要远高于普通的用户服务。高级网络切片可针对恶意攻击和无线电链路故障提供所需的可用性、鲁棒性和恢复力的水平，这些高级网络切片也可用在公共安全和应急服务领域，用于在发生紧急事件时根据需要提供额外的容量或覆盖率。发生灾害时保持网络应急服务非常重要。网络可用性通常由可用率来描述，是指已部署网络的区域在一定时间内进行目标通信时网络服务的可使用率。恢复力是指网络从故障中恢复的能力，是维持高可用性的重要特性，包括自修复特性。

时延

接入网络时延可从不同角度可分为端到端时延和传输延迟。端到端时延是指将小数据包从源节点应用层成功发送到目标节点应用层成功接收该数据包所需时间，以及发送确认信息所需时间之和。传输延迟是指数据包在源节点 IP 层与目标节点 IP 层之间的单向空口链路传输时间，包括相关协议引起的处理延迟。5G 系统必须在轻负载条件下实现小于 1ms 的传输时延。

端到端时延是终端用户能察觉到的时延。它包括数据包从源节点（例如应用服务器）到目标节点（例如移动站）穿越网络所需的时间，包括 5G 系统内部和外部的中间节点。相比之下，用户层延迟仅限于经过 5G 系统的空口链路传输时间。当应用服务器位于 5G 系统内部时，两个延迟近似相等。当应用服务器与无线电节点（例如用于设备间通信的无线电基站或另一个用户终端）处于相同位置时，后一种延迟能得到最小化。

根据使用情况的不同，5G 系统应普遍实现小于 10ms 的端到端时延，而对于超可靠的机器型通信以及触觉互联网应用，时延应小于 1ms。注意，在设定这些时延目标时，假设应用层处理时间相对于传输和交换引起的延迟而言是可以忽略。5G 系统必须使最终用户感觉网络是始终连接的。从用户角度看，网络初始接入的建立（或从空闲到连接的状态转变）几乎是瞬间完成。

移动性

移动性指的是系统为网络中移动着的用户提供无缝服务体验的能力。除了移动用户以外，经过认定的 5G 用例显示 5G 网络还要支持越来越多的静止和慢速移动用户 / 设备。因此，5G 解决方案不应为所有设备和服务提供移动性支持，而是只为那些有需要的设备和服务按需提供移动性。换句话说，就是按需支持移动性，既包括高速列车这样移动性很高的情况，也包括诸如智能仪表这样的移动性很低或静止的设备。利用用户与网络节点（基站或接入节点）之间的相对速度来表达对移动性的要求——在这个相对速度下确保一致的用户体验。

5G 网络包含很多层或切片、技术和频带，当跨越网络、各层和 / 或频段移动时应实现无缝协作。这种情况下，不同无线接入技术和相同无线接入技术切换的中断时间预计为数毫秒。5G 网络在特定应用中需要支持高达 500km/h 的移动性。

覆盖范围

人们对蜂窝信号覆盖的传统理解是：靠近基站的区域信号强，处在蜂窝边缘的区域信号弱；然而，5G 系统要求在任何时间、任何地点提供一致的用户体验。这意味着未来网络几乎可实现一致覆盖，可在任何时间和地点为所有用例提供足够高的性能。未来网络有望在资源配置和分配方式上提供灵活性，因此可以动态选择使用不同无线电资源，以根据服务要求提供覆盖范围。

传统上，设备与单个蜂窝相关联，因此当设备远离蜂窝中心时，链接性能就会降低。在以设备为中心的网络中，由网络根据测量报告和从设备中收集的位置信息来决定哪些接入点应与设备关联。这种情况下，每个设备都由围绕设备的一组优选接入点来提供服务。真正为设备服务的一组接入点包含一个或多个接入点，而且还可将部分或全部设备数据提供给少量潜在的服务接入点。接入点控制器在每次通信时都为设备提供优先接入点组和传输模式，同时考虑与接入点有关的负载和通道状态信息。

起初在 LTE-Advanced 开发中构思出来的异构网络概念在 5G 系统中将变得越来越重要。超高密度的异构网络包含大量被宏蜂窝叠加的小型蜂窝，并采用服务于小面积区域的单个或多个 RF 载波。基于分集方案、空分复用或波束成型技术的多天线系统将用来显著提高传输质量和容量并减少用户间或蜂窝间的干扰。采用大规模 MIMO 或大量一维或二维天线阵列可促进多用户调度和干扰削减。协同不同节点天线技术（例如发送和接收在网络中多个节点进行）也是一项前景看好的技术，用来提高未来网络的容量、用户吞吐量以及干扰管理水平。除了 D2D 和接近服务以外，用户设备还可用作中继，以辅助网络与附近设备之间的通信。

频谱

5G 载波频率将包括 30GHz 以上的频带（也称为毫米波频段），频谱可达到目前 6GHz 以下 IMT 频段可用带宽的十倍。汇聚或连续带宽高达 1GHz 及以上的无线信道使得 5G 系统能实现数 Gb/s 的峰值数据速率。为实现 5G 愿景和要求，最具创新性和最行之有效的解决方法之一就是使用处于高频段的大段低使用率频谱，例如 mmWave 频带最近就获得了丰硕的收益。

传统上，由于高传播损耗和缺乏低成本的组件以及其他一些原因，这些频率最多地用于户外视距回传，或者用来传输室内高分辨率多媒体流，但不用于户外无线接入链路。为了将这些利用率低的频谱用于未来的户外蜂窝应用，必须要克服两个主要障碍：具有足够大的地理覆盖面积；甚至在非视距环境（发送器与接收器之间的直接通信路径受阻）下支持移动性。

除了识别新的频谱，还可通过更高效的频谱利用策略获得更多频谱资源。如果当前频谱使用率低，可在明确界定的条件下使用授权共享接入（ASA）/ 许可共享接入（LSA）。可能需要开发 Co-primary 共享接入模式，以便通过认知无线电接入程序在多个网络运营商之间共享频谱段，而不是将频谱进行划分。

5G 移动通信系统针对极高数据速率，而实现这个目标的关键技术之一是载波聚合，该技术从版本 10 开始就用于 LTE，预计将在 5G 中进一步得到扩展。预计未来网络将专注于异构载波聚合，使大量小型蜂窝被宏蜂窝叠加。另外，具有蜂窝/Wi-Fi 双重支持的终端将会激增，而且会增加更多无线网络接口。尽管目前 Wi-Fi 卸载用来为超载的蜂窝网络缓解负荷，但预计 5G 系统将进一步使用异构载波聚合和紧密集成的蜂窝与 Wi-Fi 以及快速、无缝的 inter-RAT 切换来实现严苛的 QoS/QoE 服务要求。

2. 4GHz 和 5GHz 频带内有大量未授权频谱可用。LTE 自版本 12 开始就通过使用未授权频谱的 LTE (LTE-U)、授权辅助接入 (LAA) 和 LTE Wi-Fi 链路聚合 (LWA) 计划支持未授权频谱。这些计划有望向 5G 演进。此外，未授权频谱大多用于小面积覆盖区域，因此可实现高频复用，而且覆盖区域每平方米吞吐量比典型蜂窝部署方案高得多。低于 6GHz 的新频谱已经在 2015 年世界无线电通信大会 (WRC-15) 上分配给了移动通信，预计高于 6GHz 的新频带将在 WRC-19 上分配。可以研究频谱共享技术和灵活的频谱使用策略，用以优化频谱利用率，更重要的是让运营商有机会使用通常分配给其他无线电服务的其他频谱。根据具体的规章框架，可选用不同的频谱使用策略来分别或同时满足不同需求。

5G 备选技术和赛灵思竞争力

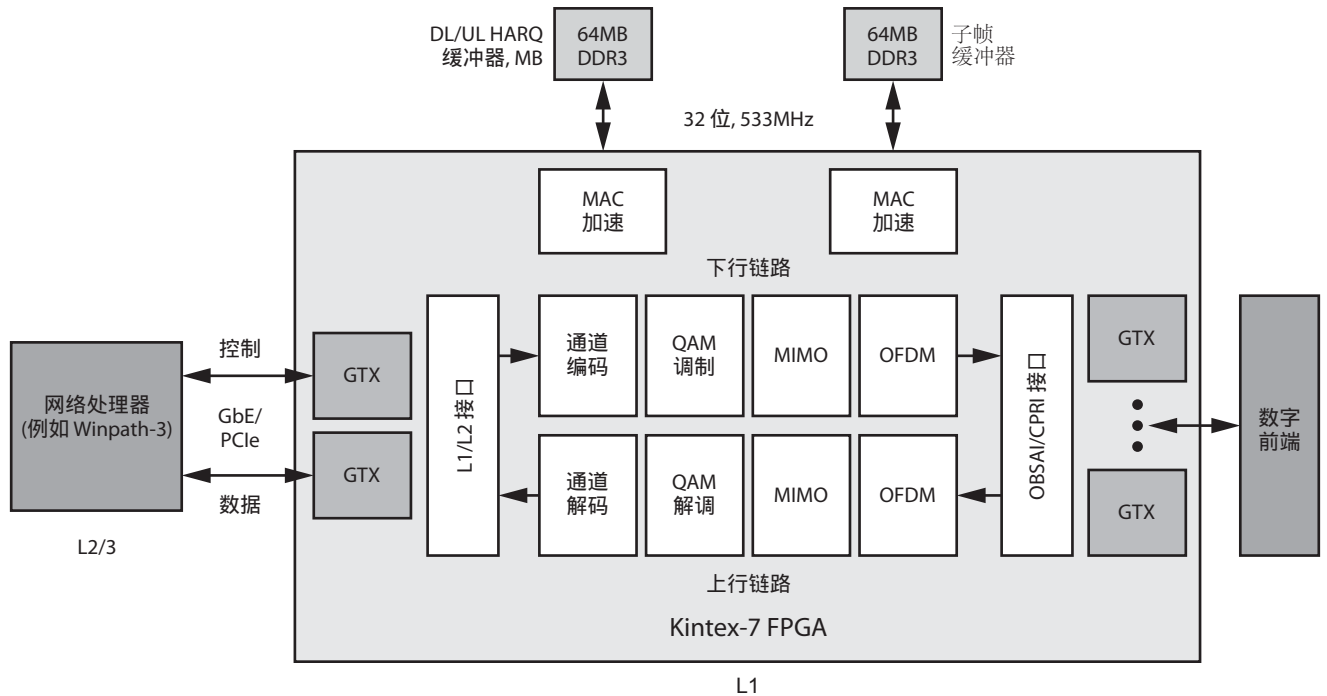
除了让系统在更高频率上运行外，还有其他几个关键技术对于向 5G 无线接入的演进也起到重要作用。本部分将介绍几个有望成为 5G 无线标准组成部分的重要方案。另外，介绍可编程 SoC 在 5G 备选技术的高效实现与商业化过程中的作用。

双工和多址接入方案

现有的蜂窝系统依靠 FDD 或 TDD 双工方案实现下行链路 / 上行链路传输。在 FDD 系统中，上行链路和下行链路信号通过偏移在频域分离，以防接收器自我干扰；而在 TDD 系统中，下行链路和上行链路传输在相同 RF 载波上进行时分复用。TDD 双工方案理论上支持动态下行链路 / 上行链路资源分区，以适应每个方向上的瞬时用户流量。传统的宏蜂窝部署方案中，TDD 下行链路 / 上行链路比例在整个网络中是固定的，以确保不会产生较强的蜂窝间干扰。不过，小型蜂窝部署方案中，由于接入节点的覆盖范围有限而且输出功率低，因此这个问题得到缓解，而且每个运行在 TDD 模式下的接入节点都可使用流量自适应的下行链路 / 上行链路比。此外，为了根据下行链路 / 上行链路流量来优化频谱利用率，可以使用灵活的双工方案。

全双工方案极有可能克服 FDD（例如使用防护频带）和 TDD（例如使用保护时间和切换点同步）系统的约束。通常不太可能使用相同频段同时传输下行和上行信号。主要难度在于节点自身传输引起的强自我干扰与来自远距离发送器的弱信号之间存在较大功率差异。实验结果显示，有可能将自干扰减小 110dB 或更多，一般通过结合使用模拟、数字和硬件抵消技术来实现。目前可实现的干扰减少幅度对于在极短距离内工作的低传输功率系统来说是足够的，因为接收到的信号比较强，足以让基站的发送功率与接收信号之间出现天壤之别。不过，这种干扰减少幅度对于当前的蜂窝系统来说显然不足，因为这种系统运行采用的发送功率更高，而且路径损耗更大。在典型的 LTE 设备中，发送器输出功率高达 23dBm，接收器灵敏度要求大约为 -113dBm，因此总共需要 136dB 的隔离度。另外，在 5G 无线电接入技术开发期间还需要进一步研究，以获得实用的发送 / 接收隔离度。

多址接入方案是物理层设计与运行的最基本方面。多址接入方案随着每代蜂窝技术的推出都在不断发展演变，从 1G 和 2G 网络的频分多址 (FDMA) 和时分多址 (TDMA) 到 3G 网络的码分多址 (CDMA) 以及 4G 网络的正交频分多址 (OFDMA) 和单载波 FDMA (SC-FDMA)。面临 5G 网络的严苛要求和多样化应用，传统的正交多址接入方案就可能不够用了。这样，人们研究了一些其他非正交多址接入方案，这些方案通过码域和 / 或功率域复用技术以相同频率 / 时间资源支持多个用户。其中包括：多用户共享接入 (MUSA)、功率域非正交多址接入 (NOMA)、稀疏码多址接入 (SCMA) 以及采用固定或自适应数字学的各种形式的 (滤波) OFDMA。可与 OFDMA 结合的非正交多址接入方案很有利，它能延续 OFDMA 的优势，同时保持向后兼容——提高数据速率并支持扩展性，实现大规模物联网连接并缩短接入延迟。复杂性较低的高级接收器、多用户调度、功率分配、参考信号、码本、反馈机制设计以及与多天线的结合是一些需要在标准中指定非正交多址接入方案之前必须要进一步研究的几个重要问题。



WP476_07_041316

图 7: 赛灵思的单芯片 LTE 基带解决方案实例 [参考资料 4]

赛灵思器件支持用于小型基站的单芯片 LTE 基带和射频解决方案，可实现最低的功耗、实现复杂性和成本。无论考虑中的解决方案范围有多广，赛灵思器件都可用来高效地实现和加速 5G 基带和射频收发器。例如，用单个 Kintex®-7 XC7K410T 器件替代多个 DSP 内核，实现 LTE L1 基带设计 (4×4 多用户 MIMO) (如 图 7 所示)，或者使用 SoC/MPSoC 全可编程器件设计从毫微微蜂窝到宏蜂窝在内的小型基站。对于后一种情况，片上处理器执行实时处理任务，包括但不限于 L1 (+L2/L3) 基带处理、数字射频前端 (DUC/DDC、CFR、DPD)、千兆位以太网回传管理、时钟与同步、针对更高层功能 (例如 IPsec) 的硬件加速、数据包加密、完整性保护以及 RoHC 报头压缩协议实现。这些器件上的 FPGA 逻辑可用来加速 L2/L3 功能，减轻处理器负荷，以便为设计人员提供更灵活的加速选项。片上逻辑资源能实现数字前端功能 (DUC/DDC, CFR, DPD) 的集成，有助于进一步降低功耗和实现最小处理延迟。通过集成的 PCIe® 连接端口可实现 Wi-Fi 无缝集成，以减轻数据负荷。

新波形

OFDM 是第 4 代蜂窝系统的主要特性，支持使用更宽的通道带宽和各种 MIMO 技术，原因在于它能处理无线通道频率选择性以及副载波正交性，而且易于通过 FFT 实现。尽管 OFDM 因使用循环前缀而需要精确的频率和时间同步并产生开销，但这种多载波方案仍被视为是用于未来无线接入设计的最具前景的波形。然而，纯粹的 OFDM 方案可能不足以应对 5G 网络的多元化应用和各种部署情景。为了满足新服务（例如关键任务机器型通信或触觉互联网）以及克服 OFDM 调制的缺点，还需要研究 OFDM 的多相滤波形式，例如滤波器组多载波（FBMC）、滤波 OFDM、通用滤波多载波（UFMC）以及广义频分复用（GFDM）。这些传输方案的共同属性是它们与传统 OFDM 相比至少在原理上能提供更多局部频谱。这与频谱共享情况息息相关。

应当注意的是，局部频谱是我们想要的波形属性，但发送器非线性可导致额外的频谱扩展，可能会减少局部波形带来的优势。为了生成局部波形，需要形成基本的时域 / 频域基础功能，方法是应用不同数字滤波器以减少带外辐射并减少或消除保护频带 / 保护时间，这样可改善频谱共存和效率。这些波形中有一些可放松对时间 / 频率同步的要求，因为（滤波后的）基础功能具有很好的频谱 / 时间局域化。滤波后的 OFDM 是一种很有前景的技术，因为它能保留 OFDM 的优势，利用数字滤波器在每个子带中形成信号的频谱，以减少带外辐射，使波形更加局域化，因而更适合用于灵活的频谱共享和无线电接入链路。此外，通过引入子带滤波器，可在相同的统一帧结构内将不同的 OFDM 数字特征——例如 FFT 大小、CP 长度和副载波间隔——用于具有不同服务要求的不同用户。滤波后的 OFDM 可进一步支持来自多个用户的异步上行链路传输，其信号可通过合适的滤波器分开，并达到最小的用户间 / 蜂窝间干扰，而且性能与同步 OFDM 相当。

快速傅里叶变换（FFT）是 OFDM 基带物理层处理中的基础构建块。赛灵思提供四种不同的高度优化的 FFT 架构（解决方案）以及系统级定点工具。FFT 使用户能够制定 DSP 算法和硬件设计所需的所有算法与实现方面的必要权衡。有了这些权衡措施之后，用户就可针对不同应用所需的具体 FFT 尺寸和处理时间来选择资源和功耗效率最高的解决方案。赛灵思 FFT 解决方案支持运行时间可配置的正向和反向复值 FFT，FFT 大小介于 8-65536 之间，即 2 的升序整数幂。赛灵思 FFT 解决方案更注重动态范围的扩展，将数据和相位因子的宽度增加到了 34 位精度，以实现 IEEE 单精度浮点数据类型的处理。浮点功能的实现方法是在内部使用精度更高的定点 FFT 实现类似于全浮点实现方案的噪声性能，但资源使用量显著减少，从而降低功耗。

编码和调制方案

T 为了满足 5G 系统在各种条件下严苛的链路预算和吞吐量要求，需要重新设计调制和编码方案以进一步缩小与最大可实现的信道容量之间的性能差距。Turbo 码和各种形式的正交幅度调制 (QAM) 广泛用在前几代蜂窝系统中，因为它们具有良好的纠错能力和性能；然而，有些 5G 用例要求极低的错误率，无法通过 turbo 码来实现。在过去几年里，无线行业对低密度奇偶校验 (LDPC) 编码的兴趣不断增加。LDPC 码经证明是一种高效编码方案，可提高传输鲁棒性和可靠性，而且具有可管理的实现复杂性和最大单位面积（每芯片）吞吐量。LDPC 码属于线性分组码，采用稀疏奇偶校验矩阵。采用稀疏分布奇偶校验架构的目的是应用概率独立的 XOR 计算，藉此将每行奇偶校验矩阵上的奇偶校验值估算结果进行聚合，而且每次后续迭代可改善估算结果。浮点迭代次数由代码设计基于系统用途和规格来决定。确定满足特定系统要求所需的最小迭代次数之前，可采取多种权衡。新型 LDPC 代码使用软判决算法进一步提升编码增益。随着分组长度的增大，对纠错能力的信心也随之增加。然而，这样也会增加计算复杂性，因为增大了奇偶校验矩阵的规模，进而增大了估算每个比特位所需的计算量。正在研究的最新星座布局法（基带调制方案）可塑造信号统计分布，实现比传统 Gray 编码 QAM 方案更大的容量。考虑载波间干扰的影响，将 FSK 与 QAM 调制组合在一起可提升蜂窝边界性能。

极性码是编码理论中的新方案，当代码块足够大时，该方案可利用简单编码器和连续消除解码器几乎达到 Shannon 容量。极性码引起了很多人的兴趣，研究重点也集中到了编码设计和解码算法。最重要的极性码解码算法之一是连续消除列表解码，其性能与最佳最大似然解码一样好，对于中代码块，列表长度为 32。近期的一些研究表明，对于短代码块和中代码块，由循环冗余校验和自适应连续消除列表解码器连接而成的极性代码要优于 turbo/LDPC 码。

赛灵思一直提供用在有线 / 无线回传的高吞吐量（高达 4Gb/s）、低功耗（小于 350mW/Gb/s）LDPC 编码 / 解码 IP 核，特别适合用于 5G 网络中针对低载荷与极低误码率的 mMTC 和 URLLC 情况。基于准循环低密度奇偶校验码 (QC-LDPC) 代码的赛灵思 LDPC 内核使用高级编码构建方法和专有优化技术来实现最佳编码性能和极低错误平层。它支持各种帧长度（每帧 64-32,768 位）以及各种调制方案 (QPSK、16QAM、64QAM、256QAM)。它采用分层的解码算法和对数似然比 (LLR) 生成逻辑以及解码器来增大迭代收敛率并实现更低的错误平层。

多天线方案

在发送器和接收器上使用多天线方案可提高无线链路的频谱效率。当用户设备天线的数量远小于基站天线时，可使用相同的时间 - 频率资源同时服务多个用户（多用户 MIMO）。这需要了解基站天线与接收器天线之间的信道特性，以便使用合适的预编码方法来消除用户间干扰。单用户 MIMO 和多用户 MIMO 都是 LTE 标准的一部分。

大规模 MIMO 对多用户 MIMO 概念进行扩展，大幅增加了基站天线的数量。这种情况下，基站天线的数量显著多于同时服务的用户数量。当数百个天线同时服务数十个用户时，频谱利用率提高 5-10 倍，同时蜂窝边缘用户获得更高吞吐量。大规模 MIMO 的性能与目前的多天线方案相比可实现数量级提高，能确保能效和更大的自由度，缓和 TDD RF 校正要求，同时，需要新的技术来减轻导频污染并估计通道状态信息。

大规模 MIMO 是多用户 MIMO 的演进。值得注意的是，在当前的无线标准下，例如 LTE 和 Wi-Fi，MIMO 通常以单用户形式实现，因此在给定通道上和给定时隙内，所有基站天线都用来与单个用户终端通信，这样，可凭借两端的天线多重性，在空间域内创建多条数据流，从而将链路容量显著增大。出于尺寸、实现、功耗和成本原因，相对终端而言，在基站建立大型天线阵列更加可行，因此，这些更大的自由度可用来同时与多个用户进行通信。然而，这是一个更加困难的问题，因为同时通信的多个用户无法方便地执行联合处理以消除该方法所产生的用户间干扰。大规模 MIMO 的事实依据是：如果基站具有数量足够多的天线，那么以本征波束形成和最大比率结合为形式的高效线性处理就成为最理想选择。这很有吸引力，原因在于这种处理不仅极为简单，而且它随阵列大小线性扩展，而且只需很有限的处理器间通信。尽管天线不贵，但具有数百个 RF 前端和 ADC/DAC 的大型阵列却十分复杂而且功耗大。因此，我们感兴趣的是探索准大规模情况，即天线数量不足以实现大规模效果，却足以使用线性 MIMO 接收器，例如最小均方误差 (MMSE) 和迫零 (ZF)。MMSE 和 ZF 通常是不受欢迎的，因为它们的复杂度呈天线数量的 3 次幂增加。

赛灵思提供多种经过优化的 IP 模块，用以根据 FPGA 和 MPSoC 快速、高效地处理 MIMO 编码/解码算法。通常，可通过 FPGA 实现的硬件加速类型包括：基带信号处理、更高层和传输加速，以及无线电信号预处理。基带信号处理加速可用于所有无线电空中接口类型，而且部分适用于需要高度计算复杂性的高级系统配置与功能。

利用无线回传或前传可连接很多小型基站，因此，很多针对接入链路的解决方案也适合回传链路。例如，将目前用于点对点回传无线电链路的更高频带用于接入链路正在考虑中。为实现更灵活的拓扑结构和更为简化的安装，对回传链路使用基于大规模 MIMO 的波束形成技术也在考虑中。由于 RRH 一般是固定的，因此，与接入链路相比，追踪移动用户和频繁估算信道的难度较小，而在接入链路中，这对毫米波和大规模 MIMO 来说都是主要问题。由于接入链路和回传链路的技术很相似，因此很多接口也可能相同。在 LTE 中使用中继已成为可能。在未来系统中，效率还可进一步得到提高，例如当中继在相同频带内使用全双工传输时。对于集成回传与接入而言，一种更有限的方法是在无线电资源管理算法中考虑回传局限性，即使回传使用的是单独的资源。

如图 9 所示，目前和规划的赛灵思 FPGA 和 MPSoC 器件的可编程性与计算能力都非常有助于实现高效设计以及 RRH 与 BBU 之间灵活的 C-RAN 功能划分。单芯片 RRH 设计如果包含 L1 和射频功能（DUC/DDC、CFR、DPD，和 ADC/DAC）、CPRI 网关、NGFI 接口、BBU 基带功能以及回传接口的高速连接，就可为 5G 网络部署提供极大的灵活性和升级简便性。

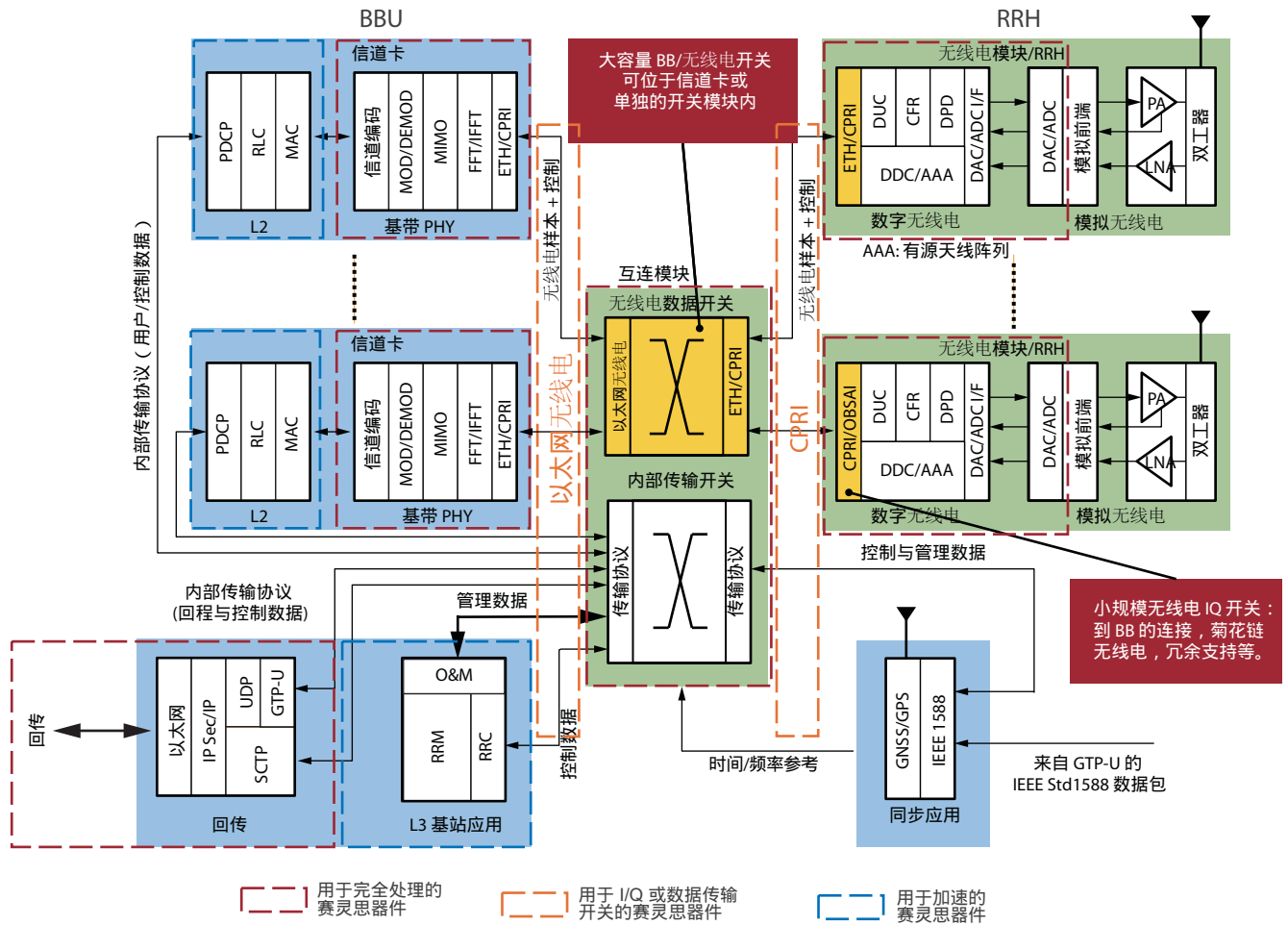
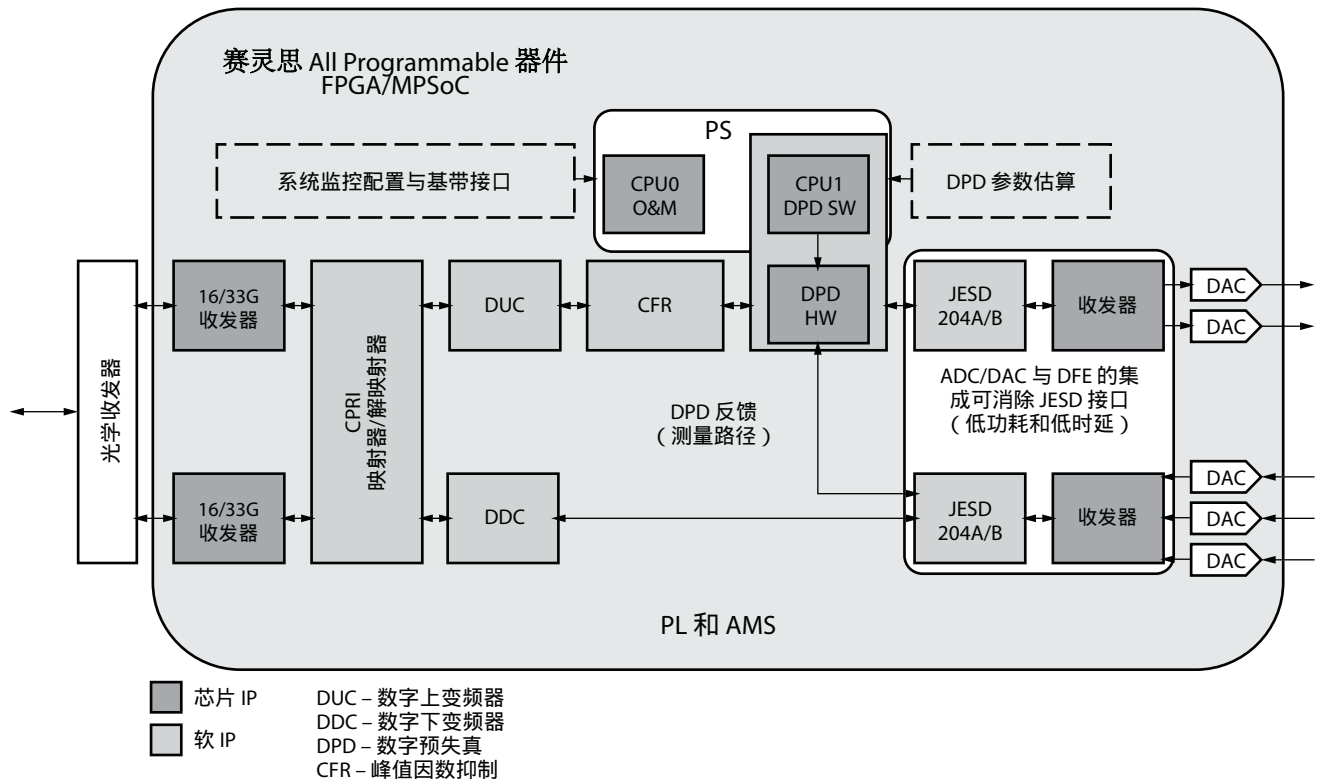


图 9: 来自赛灵思的面向 5G 高密度网络的 C-RAN 解决方案示例 (RRH、前传 / 回传接口、BBU)

新型 RF 架构

使用高速 ADC/DAC 的直接 RF 转换对于新型 RF 收发器来说是一项技术革新。超高速 DAC 利用直接数字综合将正交调制器、灵活本地振荡器和信号滤波模拟功能移动到数字域。具有直接数字综合分区的超高速 DAC 利用数字处理比模拟具有更好的扩展性，能实现更低的功耗、更快的速度、更小的晶片面积和更低的成本。然而，要获得这些优势，必须保证从数字域到模拟域的直接信号转换可实现。超高速 DAC 是使这一切成为可能的关键技术，因为它可对数字域到模拟域进行桥接。超高速 DAC 通常具有混合信号器件的特征，即工作在多个奈奎斯特区域，并以高于 1.5GSPS 的转换速率执行直接 RF 信号综合。超高速 DAC 可在载波频率为 2.0GHz (或更高) 时综合模拟带宽至少 500MHz 的输出信号。见图10。



WP476_10_060116

图 10: 赛灵思的单芯片无线电解决方案 [参考资料 4]

相较于传统的 RF 发送器架构 (zero-IF、complex-IF, 以及 real-IF), 直接 RF 采样架构的组件更少, 所占晶片面积更小。该架构以较低的功耗运行, 并可提供出色的动态性能。在 RF 性能方面, 超高速 DAC 与其他结构相比具有明显优势。采用数字上变频, 并且使数字滤波在直接数字综合中实现, 这样有助于消除增益 - 相位误差, 同时可实现完美的载波抑制以及最小化本地振荡器泄漏。这样, 当传输高阶调制 (例如 64QAM) 时, 可实现出色的 EVM 性能。嵌入式正交调制器和数字控制振荡器使直接 RF 采样成为能够在 6GHz 以下的整个频谱内进行调整的灵活收发器。例如, 单个器件可以综合多载波、多频段和多标准信号, 包括 GSM、WDM、LTE, 以及未来的 5G 空中接口。直接 RF 转换的另一个优势是能够以较低成本更高效地实现数字预失真功能。基站采用 DPD 技术进行功率放大器线性化。使用 DPD 技术时, 要求监测 PA 输出, 并检测 PA 失真结果 (图 10 中的测量路径) 以补偿互调和相邻信道漏电流。通常, 要进行 DPD 带宽扩展, 要求 DPD 反馈带宽是信号带宽的五倍。对于 100MHz 载波聚合应用来说, 这意味着 DPD 带宽必须至少为 500MHz。此外, 由于无法从主传输路径减损中识别出 DPD 反馈, 因此 DPD 反馈不能给观测信号增加减损。因此, DPD 反馈路径必须具有出色的线性度 (可增加成本和电路复杂性)。单芯片数字无线电和集成式超高速 ADC/DAC 可进一步对有源天线阵列和大规模 MIMO 架构的设计与实现进行简化, 因为它们可减少电路板上活动组件的数量。因此, 直接 RF 采样收发器是 6GHz 以下 (无外部混频器) 和 6GHz 以上 (有外部混频器) 频带的 5G 无线应用的理想 RF 架构。

可编程能力在 5G 中的作用

5G 系统需要比现有网络支持更大范围的器件和应用程序。通过可编程能力实现的灵活性是 5G 网络的重要特征，有助其快速支持新服务上市并实现高效扩展。可编程能力使网络运营商能够快速采用创新技术，并适应不断变化的网络要求。网络规划者需要确定所需的灵活程度或重配置能力以及网络中哪个或哪些层需要具有可编程性。新业务要求、连接能力（例如更大的带宽和更短的时延），以及网络功能虚拟化等因素决定了实现网络可编程和灵活性是必然要求。传输网络可编程能力有助于网络运营商利用流量动态特性，并优化网络不同部分的资源利用率。可编程传输网络有助于将传输资源分成多个切片。这些切片可分配到不同客户端（例如企业或服务提供商），实现高效的资源共享。无论何时，无论何地，只要网络中需要，可编程传输网络都可以进一步使分配到某个服务的资源比例实现扩大或缩小。可对网络进行集中或分散控制，而且网络运营方式因使用情况而定。

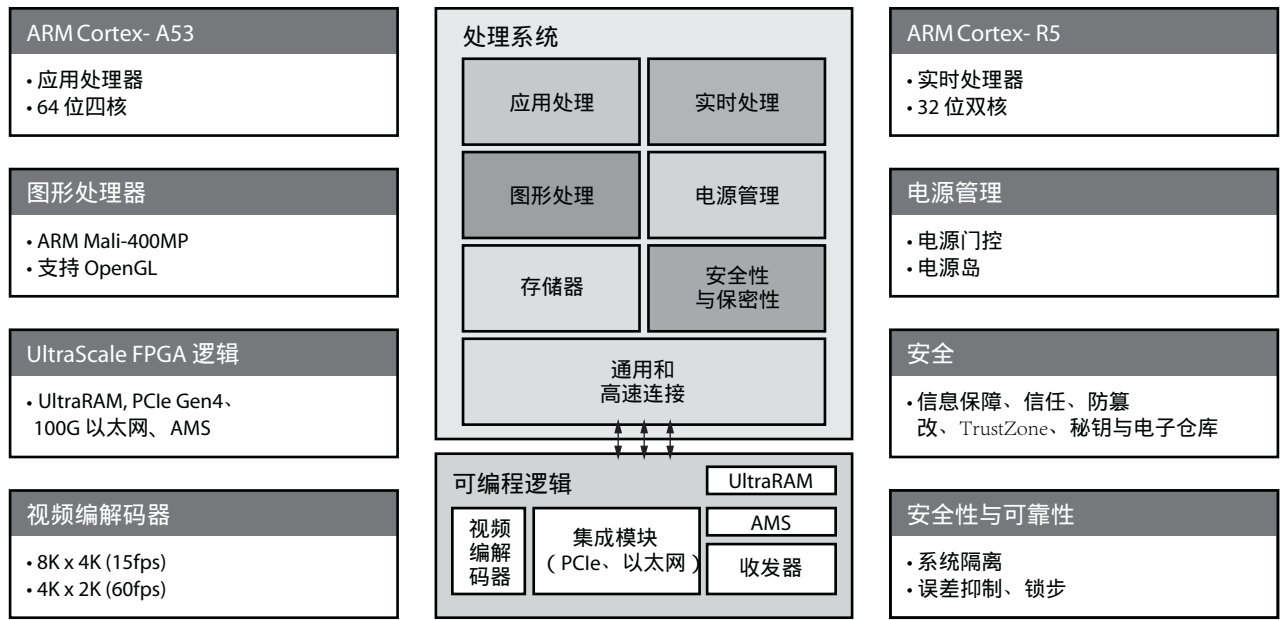
可对网络切片进行配置，以满足不同器件类型所支持的多种应用的需求，不论其对低时延、最小功耗还是大面积覆盖有需求。因此，切片层为差异化服务提供必要的支持。预计到 2020 年，系统将需要新的无线连接类型，在速度、容量、安全性、可靠性、可用性、时延和功耗等方面，这些连接将具备高度扩展性和可编程性。SDN、NFV、MEC 和通用云技术使网络能够从底层物理架构独立出来，这样它们便可以程式方式提供网络和连接服务。SDN 的优势在于能够提供物理网络基础设施的抽象。凭借网络范围的可编程性，以及从总体上改变网络行为的能力，SDN 可以大大简化网络的管理。SDN 提供的网络可编程性层次允许使用相同的物理和逻辑网络基础设施对多个网络切片（针对不同服务部署进行定制和优化）进行配置。因此，一个物理网络可支持多种服务，并以最优方式提供服务。

通过将网络功能从硬件分离，NFV 允许网络功能在通用处理器而非专用硬件上以编程方式实现。该功能可实现即时扩展，以支持按需服务的交付。NFV 的最大优势是能够独立于其位置灵活地执行网络功能。将网络功能虚拟化之后，就无需限定在具体位置或节点。同一网络功能可在不同位置针对不同网络切片层执行。根据使用条件的不同，网络功能既可放在集中化的数据中心，也可放在靠近基站的位置。通过相应地放置网络功能，相同物理基础设施就可以提供时延不同的连接。即使在非 NFV 环境中，也特别需要可编程功能来支持不同部署情况以及与基于 NFV 的平台交互。

考虑到 5G 网络特别需要可编程和可配置能力，因此，FPGA、通用处理器和 DSP 可作为备选器件，用以提供不同的设计选项和灵活性，并用于设计的各个阶段，包括从概念验证一直到产品发布的各阶段。与 ASIC 相比，FPGA 能为设计人员提供更大价值：包括灵活性、更快速的产品开发周期以及更快的上市速度。相较于 GPP 和 DSP，FPGA 在处理高计算强度算法时可利用实时时钟、加速和并行性。尽管 FPGA 过去曾用于速率较低、体积较小的设计，但今天的 FPGA 已经轻松突破 500MHz 性能屏障。由于逻辑密度史无前例地增加，并集成了其他特性，例如嵌入式处理器、DSP 模块、区域时钟以及较低价位的高速串行接口，因此新一代 FPGA 成为了几乎适用于所有设计类型的极具竞争力的高价值产品。增强的 FPGA 设计流程可消除复杂、耗时的布局规划、布局布线、时序分析以及项目的掩膜 / 重新设计阶段，因为设计逻辑已被综合，可映射到经过验证和特性描述的 FPGA 器件上。

新的 FPGA 产品还支持在运行时模块级部分重配置，且不会对网络流和服务产生干扰。这样，无论在虚拟还是非虚拟环境中，都能够为射频、基带和数据包内核设计实现更多灵活性。尽管 5G 需要覆盖更多用例、频带以及带宽组合，但新一代 FPGA 能降低总拥有成本，并延长产品生命周期，更为重要的是可以进行定制化，以在 5G 时代满足具体的用例需求。

以 20nm UltraScale™ 系列产品的成功为基础，赛灵思推出了最新 16nm UltraScale+ 系列 FPGA、3D 集成电路以及结合了最新存储器与多处理 SoC 技术的 MPSoC，提供超前一代的价值。除了实现更高性能和集成度以外，UltraScale+ 系列还包含一种名为 SmartConnect 的最新互联优化技术。这些器件扩展了赛灵思的 UltraScale 产品组合（现涵盖 20nm 和 16nm FPGA）、3D 集成电路和 MPSoC，并实现基于 16nm FinFET 技术的单位功耗性能的显著提升。进行系统级优化后，UltraScale+ 产品组合的价值远远超出传统的工艺节点移植——相对 28nm 器件，系统级单位功耗性能提升 2-5 倍、更高的系统集成与智能以及最高级别的安全性。赛灵思 UltraScale+ 产品为高处理强度的功能解决了最大瓶颈，即存储器接口。这些存储器经强化的最新可编程器件包括 UltraRAM，可提供高达 360Mb 的容量。UltraRAM 可提供最佳的系统功耗、灵活性和可预测的性能，同时在部分应用中取代了外部存储器，实现总成本的降低。赛灵思开发了面向 FPGA 的先进工具驱动的互联优化技术，名为 SmartConnect。SmartConnect 可以智能地桥接不同接口类型，以使互联效果满足具体应用要求。赛灵思 UltraScale+ 产品组合的高端产品将 3D 晶体管和第三代赛灵思 3D 集成电路的功能相结合（见图 11）。



WP476_11_050316

图 11: 赛灵思 UltraScale+ 架构与特性 [参考资料 4]

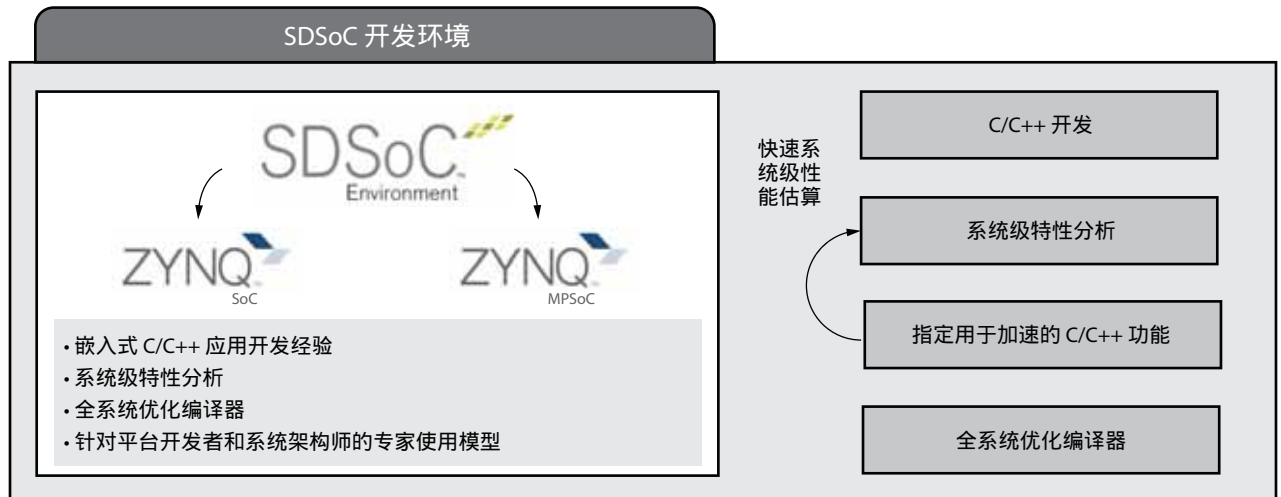
Zynq® UltraScale+™ MPSoC 利用高级 FPGA 技术，同时提供前所未有的异构多处理性能。这些新器件的系统级单位功耗性能约为以前产品的 5 倍。位于处理子系统中间的是 64 位四核 ARM Cortex-A53 处理器，它能够进行硬件虚拟化和非对称处理。处理子系统还包括用于确定性操作的双核 ARM Cortex-R5 实时处理器，以确保响应性、高吞吐量和低时延，从而实现最高级别的安全性及可靠性。独立的安全单元有助于实现军用级的安全解决方案，例如安全引导、秘钥和电子仓库管理以及防篡改功能，是机器到机器通信和工业物联网应用的标准要求。为实现完整的图形加速和视频压缩 / 解压缩，MPSoC 集成了 ARM Mali-400MP 专用图形处理器以及 H. 265 视频编解码单元。增加了专用平台和电源管理单元，用以支持系统监控、系统管理，以及每个处理引擎的动态电源门控。

赛灵思的 5G 价值定位和产品路线图

可编程逻辑器件具有关键作用，用来创建平台，以验证算法和建议，构建概念验证系统以研究、测量和演示技术建议的可行性，在标准化、早期商品化和最终产品化之前使研究小组达成一致意见。

赛灵思器件是系统厂商、运营商生态系统和学术界用以开发 5G 概念验证的首选组件。采用更高性能、更低成本的 16nm Zynq UltraScale+ MPSoC 有助于开发现场试验系统，并实现 5G 网络的早期商业化。通过与行业领导者开展技术协作，实现 5G 标准化、技术开发，和概念验证，赛灵思获得了对系统级网络规划、部署以及相关挑战的深刻理解。从行业协作中得到的合作关系和宝贵经验有助于赛灵思改进现有设计，并为其下一代产品（即 7nm 芯片系列）开发创新技术，优化设计工具、软件和硬件库、IP 模块，以及参考设计，从而以最低功耗和成本、最佳性能来实现 5G 商业化和网络大范围部署，同时为客户提供产品快速上市的优势，以及必需的灵活性与可扩展性。

这里最值得注意且最宝贵的工具是 Vivado® 高层次综合 (HLS) 工具和各种库。Vivado HLS 非常有用，可用于快速探索并精细调整针对 5G 系统而考虑的多种算法。使用 RTL 将算法模型转化为硬件需要几个月的时间，而且没有修改和设计反复的空间。Vivado HLS 将 C 模型转换为经验证的 RTL，并采用测试平台，可将设计时间从数月缩短至数周。Vivado HLS 能很好地关联算法建模与仿真工具，例如 MATLAB™ 软件。该工具更便于算法和系统设计人员使用，允许导入 C 模型和 C/C++ 实现，而且无需学习 RTL 或 FPGA 内的模块级细节和时钟约束。



WP476_12_041316

图 12: 赛灵思 SDSoC 软件开发环境 [5]

赛灵思 SDSoC™ 软件开发环境可提供嵌入式 C/C++ 应用开发工具，包括用于实现异构 all programmable SoC 和 MPSoC 的方便使用的综合设计环境。SDSoC 还包含业界首个 C/C++ 全系统优化编译器，可实现系统级特性分析、可编程逻辑中的自动软件加速、自动系统连接生成，以及用来提高编程速度的函数库。它还有助于最终用户和第三方平台开发人员快速定义、集成和验证系统级解决方案，并为最终客户实现定制的编程环境。

面向 OpenCL、C，和 C++ 的赛灵思 SDAccel 开发环境可实现多达 25 倍的每瓦特性能提升，以利用 FPGA 实现数据中心应用加速。SDAccel 开发环境结合了业界首款架构优化编译器（支持任意 OpenCL、C，和 C++ 内核的组合）、库、开发板以及针对 FPGA 的首个完整 CPU/GPU 式开发与运行时间的体验。见图 13。

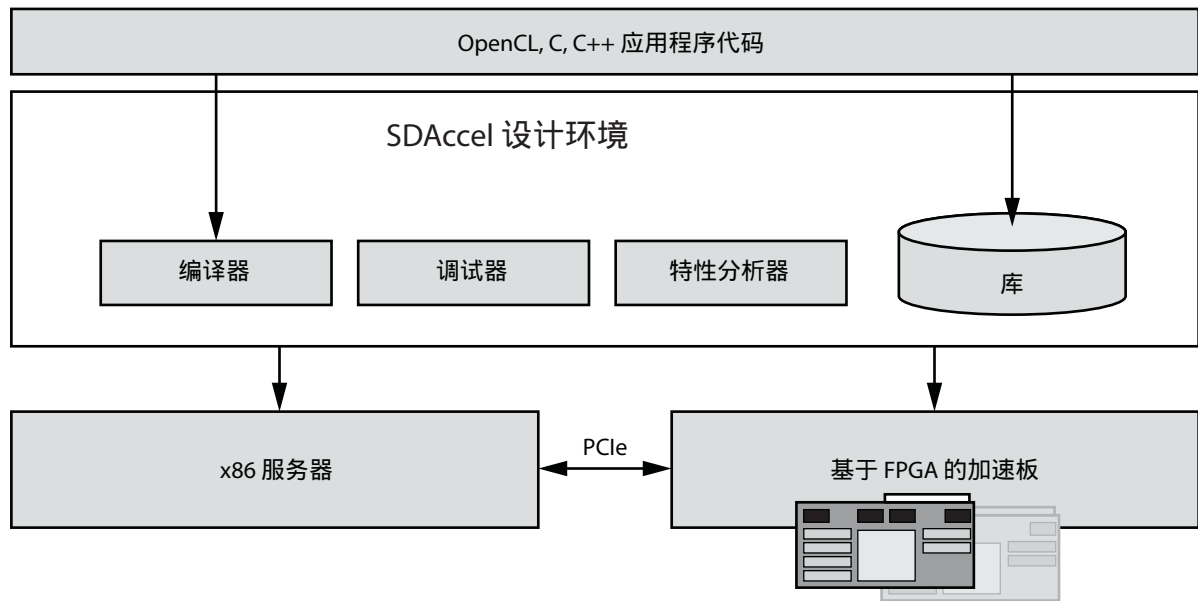
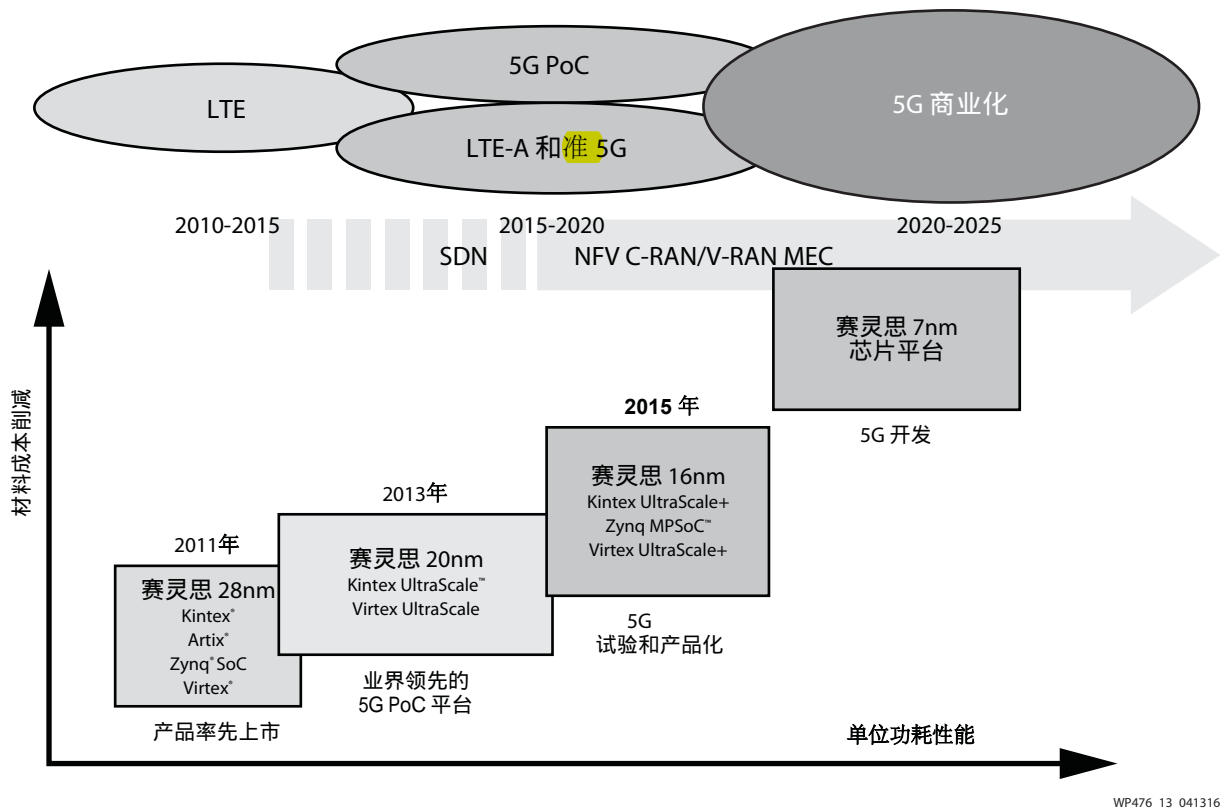


图 13: 面向 OpenCL、C, 和 C++ 的赛灵思 SDAccel 软件开发环境 [参考资料 5]

赛灵思是业界领先的无线基础设施提供商，帮助实现数字无线电前端、连接功能、基带加速以及前传 / 回传模型以及包处理等功能。

赛灵思芯片平台的可编程性、灵活性和可扩展性具有关键价值，使得赛灵思产品组合特别适合这些用途，尤其在无线电领域，因为该领域需要能够支持无线电系统的各种封装、频率、带宽和无线电接入技术，赛灵思推出了针对 28nm 无线基础设施的目标器件，与 LTE 同步推出。赛灵思是业界领先的可编程器件提供商，产品适用于蜂窝无线电、基带 CPRI 切换和基带卸载功能。赛灵思 20nm 芯片平台是 5G 概念验证的首选平台。赛灵思 16nm 芯片技术重点解决了 LTE-Advanced Pro 产品要求以及早期 5G 概念验证的商业化。赛灵思利用深入的市场影响力、内部专业知识和经验，以及与系统厂商的合作关系，积极投入 7nm 技术，以在 2020 年及以后实现 5G 设备的产品化和广泛部署。赛灵思致力于作为面向无线 / 有线基础设施和 C-RAN 数据中心的领先半导体供应商。



WP476_13_041316

图 14: 赛灵思产品路线图与 5G 开发和部署进程同步

总结

第 5 代无线系统将引领移动通信系统经历巨大变革，随时随地提供无所不在的极高吞吐量和低时延用户体验。凭借显著提高的系统容量和实时响应性能，5G 系统将实现新型服务，为用户提供真正沉浸式的丰富体验。关键任务机器通信或物联网的实现需要在大量设备之间建立可靠连接，而这只能通过 5G 系统完成。

赛灵思在此过程中起到了重要作用，可提供业界一流的 All Programmable FPGA 平台和 SoC，这些产品能够加速 5G 概念验证的开发、技术试验以及针对 5G 网络的大规模商用无线产品的尽早实现。

参考资料

1. 3GPP RAN 5G 研讨会总结 (RWS-150073)，2015 年 9 月
2. 建议 ITU-R M.2083-0，IMT 愿景——2020 年及以后的 IMT 未来开发的框架和总体目标，2015 年 9 月
3. NGMN 5G 白皮书，2015 年 3 月
4. 赛灵思 UltraScale+ 架构与产品简介
5. 赛灵思软件开发环境

修订历史

下表列出了本文档的修订历史：

日期	版本	修订描述
2016 年 06 月 13 日	v1.0	赛灵思初始版本

免责声明

本文向贵司 / 您所提供的信息（下称“资料”）仅在选择和使用赛灵思产品时供参考。在适用法律允许的最大范围内：（1）资料均按“现状”提供，且不保证不存在任何瑕疵，赛灵思在此声明对资料及其状况不作任何保证或担保，无论是明示、暗示还是法定的保证，包括但不限于对适销性、非侵权性或任何特定用途的适用性的保证；且（2）赛灵思对任何因资料发生的或与资料有关的（含对资料的使用）任何损失或赔偿（包括任何直接、间接、特殊、附带或连带损失或赔偿，如数据、利润、商誉的损失或任何因第三方行为造成的任何类型的损失或赔偿），均不承担责任，不论该等损失或者赔偿是何种类或性质，也不论是基于合同、侵权、过失或是其他责任认定原理，即便该损失或赔偿可以合理预见或赛灵思事前被告知有发生该损失或赔偿的可能。赛灵思无义务纠正资料中包含的任何错误，也无义务对资料或产品说明书发生的更新进行通知。未经赛灵思公司的事先书面许可，贵司 / 您不得复制、修改、分发或公开展示本资料。部分产品受赛灵思有限保证条款的约束，请参阅赛灵思销售条款：<http://china.xilinx.com/legal.htm#tos>；IP 核可能受赛灵思向贵司 / 您签发的许可证中所包含的保证与支持条款的约束。安全保护功能，不能用于任何需要专门故障安全保护性能的用途。如果把赛灵思产品应用于此类特殊用途，贵司 / 您将自行承担风险和责任。请参阅赛灵思销售条款：<http://china.xilinx.com/legal.htm#tos>。

汽车应用免责声明

赛灵思产品并非为故障安全保护目的而设计，也不具备此故障安全保护功能，不能用于任何需要专门故障安全保护性能的用途，比如与下列有关的用途：（1）安全气囊设置；（2）车辆控制，除非在该赛灵思产品中具备故障安全保护或者额外功能（但不包括对安装在赛灵思设备中用于执行该等额外功能的软件的使用）且会对操作人员操作失误发出警告信号；或者（3）可能会导致死亡或者人身损害的用途。客户应当自行承担因赛灵思产品被用于该等用途而产生的全部风险和责任。