

5G 基站硬件架构及演进研究

Research on Hardware Architecture and Evolution of 5G Base Station

吕 婷,张 涛,李福昌,曹 亘(中国联通研究院,北京 100048)

Lü Ting,Zhang Tao,Li Fuchang,Cao Gen(China Unicom Research Institute,Beijing 100048,China)

摘 要:

基站硬件架构决定了设备形态与性能,进而影响 5G 网络的服务能力。5G 时代多样化的业务需求对网络能力提出了更高要求,推动 5G 基站向专用硬件增强与架构通用化 2 个方向持续演进。介绍了 5G 基站的硬件架构、核心器件及产业发展状况,分析了基站硬件架构的未来发展趋势。

关键词:

5G;基站;硬件;架构;演进

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.02.004

文章编号:1007-3043(2022)02-0021-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The hardware architecture of base station determines its form and performance, and then affects the service capability of 5G network. In the 5G era, the diversified services require higher network capabilities, which promotes the continuous evolution of 5G base station towards dedicated hardware enhancement and architecture generalization. It introduces the hardware architecture, key components and industrial development of 5G base station, and analyzes the future evolution trend of base station hardware architecture.

Keywords:

5G; Base station; Hardware; Architecture; Evolution

引用格式:吕婷,张涛,李福昌,等. 5G 基站硬件架构及演进研究[J]. 邮电设计技术,2022(2):21-25.

1 概述

5G 作为支撑经济社会数字化转型的关键新型基础设施,已经驶入网络建设与商用的快车道。5G 基站是无线接入网的核心设备,其硬件架构与能力直接影响 5G 无线网络的性能。随着 5G 网络的发展,基站设备已经历了由原型设备到商用设备的发展过程,硬件平台更新换代,设备形态逐步丰富和完善,设备性能得到了很大提升,具备大带宽、低时延、广连接的网络能力。未来,随着 5G 产业链的发展,5G 基站硬件架构还将进一步演进,以更好地支撑数字化时代涌现出的多样化新业态。

在 5G 加速发展之际,有必要对 5G 基站的硬件架构及产业发展状况进行系统的研究,同时展望未来的发展趋势,引导 5G 基站设备持续演进,助力高质量、灵活高效的 5G 网络部署。

2 5G 基站硬件架构

5G 基站设备的整体架构可分为 2 类:BBU+AAU/RRU 2 层架构、CU+DU+AAU/RRU 3 层架构。其中, CU、DU 为基带设备,共同完成 5G 基带协议处理的全部功能。CU 负责高层基带协议处理,并提供与核心网之间的回传接口;DU 完成底层基带协议处理,并提供与 5G AAU/RRU 之间的前传接口;CU 与 DU 之间通过 F1 接口交互。BBU 集成了 CU 与 DU 的全部基带处理功能。目前,5G 基站设备主要采用 BBU+AAU/RRU 2

收稿日期:2022-01-05

层架构,因此下文主要分析了5G BBU与AAU/RRU的硬件架构。DU设备架构与BBU类似,主要基于专用硬件平台实现,而CU设备则一般基于通用硬件平台实现。

2.1 5G BBU硬件架构

5G BBU是基带设备,硬件架构如图1所示,包含基带处理单元、主控传输单元、电源模块以及接口单元等功能模块。其中,基带处理单元主要完成基带协议处理,提供与AAU/RRU通信的接口;主控传输单元负责基站的配置管理、信令处理、资源管理、数据传输,提供传输、时钟、LMT接口,电源模块主要用于设备内部直流供电的管理。

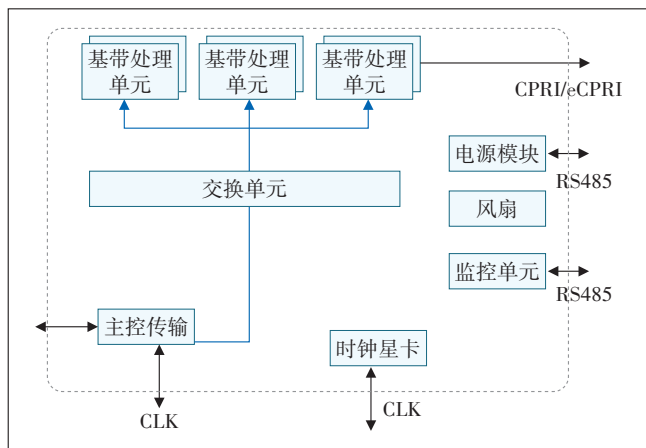


图1 5G BBU硬件架构

硬件实现方面,5G BBU内部集成了多种半导体器件与芯片,主控传输单元与基带处理单元内部的核心器件如图2所示。处理器(CPU)主要用于高层基带协议以及控制信令处理;基带芯片(ASIC)是BBU的关键芯片,负责底层基带协议处理以及软件算法的实现;FPGA芯片用于基带协议处理中的硬件加速,实现加密/解密或接口转换等专用功能;光模块负责完成光电信号转换功能,用于前传接口处理;交换芯片用于与外部接口之间的数据交换;高精度晶振用于支持BBU内部各功能模块之间的同步。

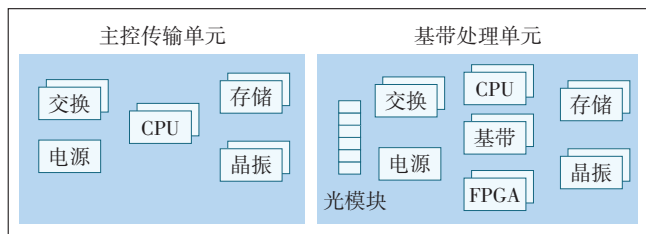


图2 BBU内部核心器件

2.2 5G AAU/RRU硬件架构

5G AAU/RRU主要完成基带数字信号与射频模拟信号之间的转换以及射频信号的收发处理功能。对于6 GHz以下频段,AAU设备主要分为64T64R、32T32R、16T16R等主流规格,分别支持64、32、16个射频收发通道。随着通道数的增加,CPRI接口的带宽需求大幅上升,为了降低前传接口的带宽需求,5G AAU采用eCPRI接口,将BBU的部分底层基带协议处理功能上移到AAU。对于2通道、4通道等低通道数的5G射频设备,仍采用传统的RRU+天线的设备形态,设备内部无内置的天线阵列。

5G AAU与RRU的硬件架构基本相同,如图3所示,设备内部包含了接口、数字基带、数字中频、收发信机、功放、双工器等主要模块与器件。其中,接口模块主要用于前传接口信号处理,数字基带模块负责底层基带信号处理,数字中频模块实现上下变频、预失真和波峰系数降低等功能,收发信机模块完成数模/模数转换(ADC/DAC)以及模拟信号的接收与发射信号处理功能,功放/低噪放分别完成下行与上行信号的放大,滤波器用于发射及接收信号的选频以及干扰抑制,双工器用于接收与发送通道的信号滤波与收发切换。

3 5G基站核心器件及产业现状

3.1 5G BBU核心器件

5G BBU主要基于专用硬件实现,内部集成了ASIC、CPU、FPGA等半导体器件,核心器件的产业发

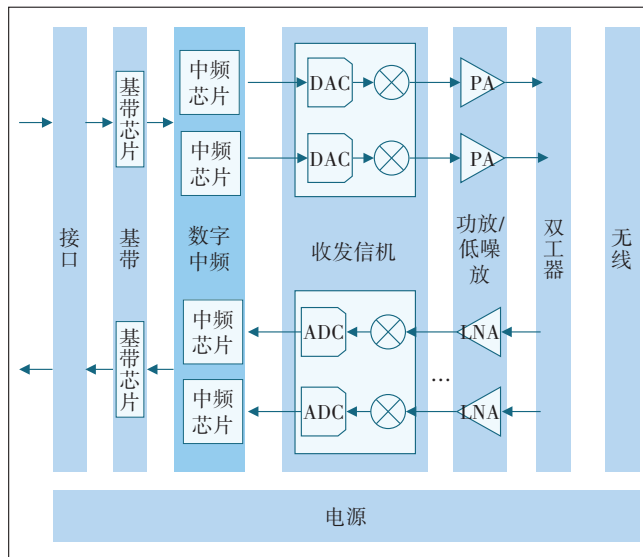


图3 5G AAU/RRU硬件架构

展状况直接影响BBU设备的性能。一方面,核心器件的性能与工艺水平决定了BBU设备整体的硬件处理能力与集成度;另一方面,半导体产业发展也可推动专用硬件平台代际更替,优化BBU硬件架构,提高设备性能。

5G BBU内部,基带芯片是最关键的器件之一,可以反映不同设备的性能差异。基带芯片一般采用设备厂商自研的ASIC架构,业界主要采用14 nm或7 nm工艺,5 nm芯片正在技术导入阶段,台积电和三星已具备5 nm量产能力。BBU使用的处理器主要以ARM架构和X86架构为主,采用高性能的处理器芯片以提供更强大的运算性能、更低的功耗,支持5G基带的复杂处理功能。FPGA即现场可编程门阵列,相比ASIC,具有可编辑、更灵活、产品上市时间短等优势。5G BBU使用FPGA以更好地支持设备软硬件的后向升级。由于行业技术壁垒高,FPGA核心技术被Xilinx、Intel、Lattice等头部公司垄断,国外三巨头占据全球市场份额的90%。

3.2 5G AAU/RRU核心器件

5G AAU/RRU使用的核心器件主要包括基带芯片、数字中频芯片、收发信机芯片、ADC/DAC、功放、滤波器等。

其中,5G基站使用的功放主要采用LDMOS和氮化镓2种技术。在高频、大带宽、高功率的工作条件下,氮化镓功放的性能优于LDMOS。一般,5G高频段设备使用GaN功放,而低频设备则2种功放并用。LDMOS器件工艺比较成熟,主要采用8英寸140 nm工艺,主流供应商有NXP、Qorvo等。氮化镓器件成本较高,制造工艺更加复杂,主要厂商包括住友、Wolf-speed、Qorvo等国外厂商以及能讯、创元达等国内厂商。

高速高精度的ADC/DAC是5G基站的不可或缺芯片。目前ADC/DAC市场份额分别被ADI、TI、MAXIM、等国外厂商独占,国内厂商在ADC/DAC芯片领域起步晚,能够量产高精度、高速度ADC/DAC的厂商较少,产品线比较单一。

基带与数字中频芯片的能力需满足100 MHz载波带宽、64路射频收发通道以及复杂的波束赋形算法处理的需求。主要采用主设备厂商自研的ASIC芯片,目前采用14 nm或7 nm工艺,下一代芯片将支持5 nm或3 nm技术。

收发信机芯片用于收发链路的信号处理,可集成

数字变频、混频、多通道ADC/DAC、放大和滤波等功能。目前业界主流的芯片供应商为ADI和TI,单芯片支持四路射频通道处理,后续随着制程水平发展,可进一步提高单芯片的处理能力,降低AAU体积与功耗。

4G RRU使用的滤波器主要以金属腔体滤波器为主,工艺成熟、价格低,但由于金属整体切割导致体积较大。5G时代,AAU天线数量大幅增加,对滤波器的尺寸与发热性能也有更高的要求,使得金属腔体滤波器应用受限,陶瓷介质滤波器体积小、温度稳定性高,成为较好的解决方案。因此,5G AAU前期采用工艺成熟的小型化金属滤波器,后期将主要采用陶瓷介质滤波器。目前,规模较大的陶瓷介质滤波器厂商主要有灿勤、国华、凡谷等。

4 基站架构的未来演进

4.1 演进方向分析

在多样化业务需求的驱动下,5G网络需要具备更加弹性、灵活的业务提供能力,这就对5G基站设备提出了更高要求,推动设备硬件平台迭代更新、基站架构持续演进。5G基站架构的演进分为专用硬件增强与架构通用化2个方向。

a) 专用硬件增强。现阶段5G基站设备主要在专用硬件平台上实现,通过定制化器件与配套软件高效地实现BBU与AAU/RRU的特定功能。后续,随着5G产业链的发展,核心半导体器件的性能将不断提升,专用硬件平台的性能也会逐代增强。对于5G BBU设备,未来可通过升级5 nm/3 nm工艺、优化ASIC设计、增强基带芯片能力、引入更高性能多核处理器、FPGA等芯片等方式,提升载波与数据流处理能力,支持多模共平台。对于5G AAU/RRU设备,通过优化架构设计与算法、提高数字与模拟芯片集成度、引入新材料等手段,使设备向着小型化、绿色节能的方向不断增强。

b) 架构通用化。通过将基站软件功能与硬件解耦,结合硬件资源云化、基站功能虚拟化等技术,可逐步实现基站架构通用化。与专用硬件设备相比,通用化架构的基站设备支持灵活的软件部署与修改,硬件资源完全共享并可以由上层应用按需灵活调用,同一硬件平台可兼容不同制式系统,支持按需开通,实现通信网络的敏捷部署。同时,通用硬件平台支持后向平滑演进,可提高设备利用率,延长生命周期,降低网

络建设成本。目前在移动通信网络中,核心网和数据中心等基础设施已经广泛采用了通用化硬件架构,满足上层应用对于底层基础资源的弹性伸缩需求。在无线接入网领域,硬件通用化尚处于尝试探索阶段,相关技术及产业还不成熟,通用硬件平台的性能还无法支撑基站设备的全面通用化。

4.2 2种基站架构的对比

基于专用硬件与通用硬件的2种基站架构存在本质的区别,如图4所示。

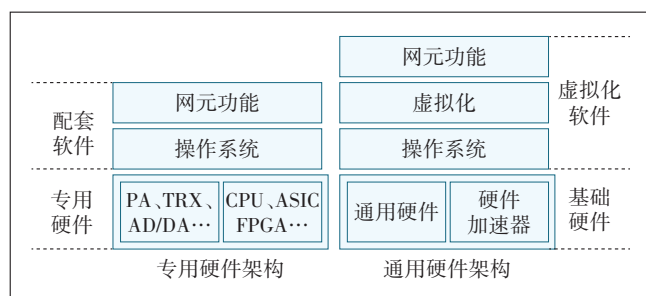


图4 基站架构对比

对于专用硬件架构,专用硬件层主要包含CPU、ASIC、FPGA、射频芯片等,通过内部的高速交换接口或专用背板实现互联。上层配套软件系统实现协议栈基本功能以及设备商私有算法;软件系统与底层硬件紧耦合,设备内部接口对外不可见。

对于通用硬件架构,基础硬件层主要由通用计算、存储、网络等硬件资源以及FPGA/ASIC等硬件加速器构成,其中,硬件加速器主要用于完成基带物理层协议、加/解密或接口交换等功能,卸载通用处理器的负荷。虚拟层提供对底层硬件的抽象、动态重构与管理,完成对硬件资源的灵活调配与控制,为上层应用提供虚拟的计算和转发功能。网元功能层实现各类虚拟化网元功能,比如BBU、CU、DU等基站功能。基于虚拟化技术的网元功能可根据业务需求灵活编排,并支持向更高层的应用平台开放底层设备能力。

2种架构在硬件实现、开放性、扩展性、资源调配方式、技术成熟度、产业生态等方面均存在各自的优劣势,如表1所示。

传统的基站设备基于专用硬件平台实现,从2G发展到5G,专用硬件的集成度与处理能力逐代增强,设备体积变小、容量增大。但是,由于专用设备固有的封闭性,传统基站的软件与硬件完全绑定,采用基站设备厂商定制化的ASIC架构以及配套软件系统,设备内部实现对外不可见。这种高度固化、集成化的设备

表1 2种基站架构的对比

对比项	专用硬件架构	通用硬件架构
设备实现	专用硬件平台+配套软件	通用硬件平台+开源虚拟化软件
开放性	软硬件绑定,封闭系统,黑盒设备	软硬件解耦,开放架构,白盒设备
扩展性	ASIC架构导致硬件能力固化,不能灵活调整,新功能引入需要较长开发周期	软硬件资源可灵活调整、弹性扩容,软件功能按需定制、快速升级
资源调配方式	专用资源不支持灵活共享,造成资源浪费、利用率低	所有资源支持池化共享、按需调度,资源利用率高
技术成熟度	传统架构,技术比较成熟,随着专用硬件产业链的发展迭代增强	应用于基站设备的通用硬件及虚拟化技术方案尚不成熟
产业生态	存在技术壁垒,产业下游以传统的基站设备厂商为主	开放架构便于吸引更多厂商参与设备开发,丰富产品形态,繁荣产业生态

在能效、体积方面存在天然的优势。但另一方面,这种黑盒化的设备存在可扩展性差、资源调配不灵活、资源利用率低等问题。同时,封闭的系统不利于扩大产业生态圈,造成一定的行业壁垒。

通用化的基站设备基于通用硬件平台与虚拟化技术实现,天然地具备开放、可扩展性强的优势。支持软硬件解耦、硬件资源按需调度、软件功能灵活定制,进而支持弹性扩容、软件快速升级,同时可根据业务的潮汐变化灵活调配资源,获得资源池化共享增益,提高资源利用率。此外,通用化设备的开放架构便于吸引更多厂商参与设备开发,丰富产品形态,繁荣产业生态。但是,目前通用硬件的处理能力还不足以完全满足5G基站的性能要求,特别是基带物理层功能与射频处理模块,对于算力、处理实时性、功耗等方面的要求较高,x86或ARM等通用处理器无法完全替代传统的ASIC或FPGA电路。另外,虚机、容器等虚拟化技术方案在基站中的应用还不成熟,有待逐步完善,满足电信级应用的需求。

在5G基站演进过程中2种架构将并存。对于容量、能效等要求较高的宏基站设备,专用硬件架构还将继续发挥其技术成熟、集成度高的优势;对于体积、功耗较小的微站设备则可先行实现通用化架构演进,充分发挥其开放、弹性灵活的优势,以更好应对各类垂直行业的多样化部署需求。

4.3 未来发展趋势展望

基站硬件架构的通用化演进将给5G产业链带来诸多影响,不仅会推动原有的基站产业链上下游加强技术创新、加速产品迭代,也会吸引更多的厂商参与

产业链的各个环节,包括基础硬件、虚拟化软件、业务平台、系统集成等各个领域,构建更加开放、融合的产业生态,催生新的商业价值。

基站架构的通用化将会是一个分阶段演进的过程。现阶段,基于通用硬件架构的基站设备可在 CU、DU 分离架构的基础上实现。通过将高层基带协议功能部署于 CU,将底层基带协议功能部署于 DU,进行 5G 协议栈切分。在此基础上,基于通用硬件平台实现 CU 设备的全面通用化,DU、BBU 设备通过进一步功能划分实现部分模块的通用化。未来,随着硬件性能的提升以及虚拟化技术的发展,逐步实现 DU、BBU 设备的全面通用化。

由于 5G RRC、SDAP、PDCP 等高层基带协议对硬件处理实时性的要求相对宽松,易于移植到通用硬件平台来实现。因此,CU 设备可完全基于通用硬件平台实现。而基站物理层协议功能对硬件的运算速度、处理时延等要求较高,现有通用硬件及虚拟化技术还无法满足要求。此外,与专用的 ASIC 或 FPGA 架构相比,通用硬件在集成度、功耗方面也存在不足。因此,DU/BBU 设备还无法完全基于通用硬件平台实现,还需要经历从部分通用化到全面通用化的发展过程。现阶段,DU/BBU 设备需要在通用硬件平台的基础上进一步增加专用的物理层加速器,通过标准的 PCIe 接口,支持在通用硬件平台上即插即用。未来随着通用硬件性能的提高,DU/BBU 设备可完全基于通用硬件平台实现。

在通用化演进的基础上,基站架构还会进一步向着开放、融合、智能等方向发展。

首先,传统基站的架构是封闭的,设备内部接口私有化,网络资源、信息与数据不开放。在通用硬件平台之上,可进一步定义标准化的开放接口,支持不同虚拟化网元之间互通;同时通过微服务化架构将网络能力抽象为服务,以服务的形式对外提供开放的资源,支持网络能力按需定制,打破传统网络的封闭性。

其次,随着网络的发展,目前运营商面临着多频段多制式并存、设备类型繁多、部署维护复杂的问题。随着基站架构的通用化演进,可基于统一的云平台,实现各类虚拟化网元功能,简化在网设备类别。此外,通用架构的基站设备还可与移动边缘计算单元、核心网单元共平台部署,构建一张端到端的融合网络。

另外,网络的智能化演进也是未来的必然趋势。

将人工智能技术引入基站,增强协议实现算法,优化处理流程,提升资源调度效率,实现基站内生的智能,使得设备性能达到最大化,促进网络与业务的协同。在基站侧引入 AI 技术对于设备硬件能力有一定的要求,算法模型越复杂、训练数据量越大,对于算力的要求越高。在基站架构通用化演进后,基础硬件支持池化共享、弹性扩容,硬件资源不会成为瓶颈,可充分发挥出基站内生智能的潜力。

5 结束语

5G 商用网络将面向 To C、To B 等多样化的业务场景,为了支持灵活的网络部署,5G 基站设备将存在多种硬件架构与设备形态。目前,5G 基站以 BBU+AAU/RRU 架构的设备为主,基于专用硬件架构实现。由于专用硬件设备在扩展性与灵活性方面存在固有的不足,为了满足差异化的功能与性能要求,5G 基站还将向通用化架构方向演进。本文分析了 5G 基站硬件架构及产业现状,并展望了基站架构的未来演进趋势,提出基站设备将向着专用硬件增强与架构通用化 2 个方向发展。由于 2 种架构在硬件实现、开放性、扩展性等方面均存在差异,在 5G 基站的演进过程中,2 种架构仍将并存,针对不同的设备形态以及多样化的部署场景,充分发挥出各自的优势。

此外,在通用化架构演进的基础上,未来基站设备还将向着开放、融合、智能的方向持续演进,为丰富多样的 5G 业务提供更有保障的服务能力,这些方向还需要后续进一步探索。

参考文献:

- [1] 吕婷,曹亘,李铁群,等. 基站架构及面向 5G 的演进研究[J]. 邮电设计技术,2017(8):46-50.
- [2] 吕婷,曹亘,张涛. 5G 基站架构及部署策略研究[J]. 移动通信,2018(11):72-77.
- [3] NR; NR and NG-RAN Overall Description (Release 16): 3GPP TS 38.300[S/OL]. [2021-12-22]. <https://www.3gpp.org/>.
- [4] NG-RAN; Architecture description (Release 16): 3GPP TS 38.401[S/OL]. [2021-12-22]. <https://www.3gpp.org/>.

作者简介:

吕婷,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要从事 5G 网络技术及基站设备研究工作;张涛,高级工程师,硕士,主要从事移动网通信技术标准、组网应用方案研究工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,国家知识产权局中国专利审查技术专家,主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作;曹亘,高级工程师,博士,主要从事移动网通信网络新技术、标准化研究工作。