



# Open5G: 5G网络的开放生态

White Paper V4.0 I  
2017.11



## Executive Summary

Three key application scenarios in 5G break the boundaries of communication between human beings in traditional mobile communications, forcing 5G to support communication of human-to-machine, and machine-to-machine. However, various application scenarios and requirements together with emergingly diversified standards and technologies call for an open 5G (Open5G) network, which is featured with flexibility and customization. This white paper investigates the concepts, challenges and opportunities of Open5G network. The main contributions of this white paper is summarized as follows:

(1) **Key concepts of Open5G:** upon analyzing the technical requirements, the concept of open networks is provided from three different open levels, namely, black-box, white-box and gray-box networks. Specifically, black-box open networks provide third-party applications or developers with supporting services and key network capabilities via open application programming interface (API). White-box open networks refer to the fully open network, which includes open source software developing and white-boxing hardware design. The gray-box network is an partial open network, where telecom operators and the equipment manufacturers cooperatively design the customized network devices. Then, the overall objectives of open network architecture are figured out. Driven by developing requirements, open network architecture should decouple network capability providers and solution providers, enabling the former to effectively design network architectures with finite resources and reducing the dependence of the latter on the technical details.

(2) **Enabling technologies of Open5G:** for open core network, 3GPP 5G service-based architecture is discussed and then MulteFire-based base station and open core network adopting distributed managements is provided. Centralized unit/distributed unit (CU/DU) architecture of open radio access network is discussed, featured with open CU, open API to DU, and white-boxing remote radio unit /active antenna unit (RRU/AAU). After defining the open terminal from the view of equipment capability and openness, an open terminal architecture is given, including open software/hardware resource architecture, and open configuration and management layer. The open methods of physical layer are open API to facilitate end to end network slices and software defined air interface (SDAI). Meanwhile, based on software defined radio and SDAI, an open smart physical layer architecture is proposed. Upon introducing free open source hardware (FOSH) platform, the requirements of Open5G hardware platform are summarized and the open hardware architecture is presented.

(3) **Use case for Open5G:** the definition of open source and open API and the relationship

between them are clarified. Then, the use case for Open5G from different corporations and institutions is presented, including OneNET, China Telecom 5G SDR platform, mH-IoT platform, TCL 5G SDR platform, and super BS platform.

Open source and openness of software/hardware ecosystem for 5G network are still in their infant stage, so, currently, there are still many different definitions and solutions. This white paper aims at to tease out and analyze key concepts, the possible solutions, and technical challenges, providing a guidance for building open ecosystem for 5G networks in the future.



# 目 录

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| <b>Executive Summary .....</b>     | <b>1</b>  |
| <b>1 引言 .....</b>                  | <b>5</b>  |
| <b>2 开放网络的基本概念 .....</b>           | <b>7</b>  |
| 2.1 开放网络基本内涵.....                  | 7         |
| 2.1.1 面向5G演进的技术需求分析.....           | 7         |
| 2.1.2 能力开放的黑盒网络.....               | 9         |
| 2.1.3 完全开放的白盒网络.....               | 10        |
| 2.1.4 半开放半封闭的灰盒网络.....             | 10        |
| 2.2 开放网络架构的总体目标.....               | 11        |
| 2.3 SDN/NFV .....                  | 12        |
| <b>3 开放式核心网 .....</b>              | <b>13</b> |
| <b>4 开放式无线接入网 .....</b>            | <b>14</b> |
| 4.1 Open-RAN (ORAN) 开放式无线网络概述..... | 14        |
| 4.2 开放的CU提升行业竞争力 .....             | 14        |
| 4.3 开放接口的DU提升网络性能.....             | 16        |
| 4.4 白盒化的RRU/AAU降低成本.....           | 16        |
| <b>5 开放式终端侧使能技术 .....</b>          | <b>16</b> |
| 5.1 开放式终端侧的内涵与外延.....              | 16        |
| 5.2 开放式终端侧使能技术.....                | 17        |
| <b>6 开放物理层 .....</b>               | <b>19</b> |
| 6.1 开放物理层内涵与外延.....                | 19        |
| 6.2 开放物理层框架.....                   | 20        |
| 6.3 需求与技术挑战.....                   | 22        |
| 6.4 应用与机遇.....                     | 23        |
| <b>7 开放硬件平台 .....</b>              | <b>25</b> |
| 7.1 FOSH硬件平台 .....                 | 25        |
| 7.2 Open5G开放硬件平台介绍 .....           | 26        |
| <b>8 Open5G开放示例 .....</b>          | <b>28</b> |
| 8.1 OneNET .....                   | 29        |
| 8.2 5G SDR平台 .....                 | 30        |
| 8.3 mH-IoT智慧医疗物联网平台 .....          | 30        |

---

|     |                    |    |
|-----|--------------------|----|
| 8.4 | TCL 5G SDR平台 ..... | 32 |
| 8.5 | 超级基站平台介绍.....      | 33 |
| 8.6 | Open5G开源硬件实例 ..... | 34 |
| 9   | 总结 .....           | 36 |
|     | 缩略语对照表 .....       | 37 |
|     | 致谢 .....           | 39 |

# 1 引言

为了应对万物互联的挑战，满足超高速率、超低时延、高能效和超高流量与连接数密度等多维能力指标，开放、开源、协同创新将是5G发展的必由之路。随着5G网络与技术不断的开放与开源，未来将会涌现出更多新的业态和应用，从而开辟一个巨大的蓝海市场。

目前，学术界和产业界已先后创建多家开放实验室、开源联盟或组织，通过积极推进开放式5G，加快5G技术、标准、产品的研发，最终建立全球统一的5G生态系统。例如，网络功能虚拟化开放平台（OPNFV），通过整合各种开源系统进行NFV的开发和演进，形成一个开源的NFV参考平台，验证多厂商可互操作的NFV解决方案、加速新产品和服务的引入。开放网络自动化平台（ONAP）致力于开发一个具有实时的、策略驱动编排、物理和虚拟网络功能自动化的统一开发平台，使得开发者和服务提供商能够快速提供新服务。Open Air Interface (OAI) 是欧洲EURECOM组织发起并维护的一个开源软件定义无线电（SDR）开发平台，提供LTE网络核心网、接入网和用户设备的开源软硬件开发工具。开放雾联盟（OpenFog Consortium）力图通过开发开放式架构、分布式计算、联网和存储等核心技术以及实现物联网全部潜力所需的领导力，加快雾计算(Fog Computing)技术的部署。

## ● 什么是开放式5G（Open5G）？

虽然Open5G是一个新概念，但开放系统、开放体系架构的发展历史却由来已久。对开放系统与开放体系架构的研究，不仅奠定了开放式5G网络及其关键技术的研究基础，也有助于我们更好地理解开放式5G的内涵与外延。

开放式5G网络架构，内涵比较丰富，定义方法、形式比较多，争议也比较大。例如，由中国移动牵头提出的基于服务的网络架构（SBA）被3GPP确认为统一基础架构，该架构面向云化设计，通过网络功能的模块化实现按需的灵活定制组网。IMT-2020（5G）推进组提出的5G网络架构，基于接入平面、控制平面和转发平面解耦，采用模块化功能设计，构建针对多样性应用的虚拟专用网络，并通过软件定义网络（SDN）/NFV技术提升灵活组网的能力。欧盟5GPPP在“View on 5G Architecture”白皮书中提出，为增强5G架构的灵活性，应通过部署网络切片技术、网络软件化、整合通信和计算、整合易购接入技术，来满足5G网络应用的多样性。华为原生云5G网络架构（Cloud-Native 5G Architecture）提出了一个“全云化”策略。该架构具有的特点有：网络切片自适应产生、维护和终止；利用无线云网络（C-RAN）重构无线接入网；通过控制面和用户面分离、基于组件的功能、以及统一的数据库管理，简化核心网结构。

虽然“开放式5G网络架构”尚没有一个统一的定义，但我们认为，应该具备两个基本的属性，即：网络针对不同场景的特殊需求具有灵活性和定制化的特性。其中，灵活性是指网络基础设施中的网元能够以一种即插即用的方式激活或关闭，从而实现网络的“硬”重构；定制化是指通过软件定义网络、网络功能虚拟化等技术，为用户的特定需求提供虚拟的专用网络，从而实现网络的“软”重构。

因此，开放式5G网络强调但不局限于以下几个重点：

(1) Open5G是独立于物联网应用与垂直行业需求的基础互联互通网络。

(2) Open5G倡导的核心是“开放”，开放的目的是为了实现5G与物联网与垂直行业的深度融合，进一步促进跨行业、跨网络、跨系统、跨平台的物联网与垂直行业应用之间的互联互通，以达到万物互联的目的。

(3) 开放式5G网络架构，关注的是承载多样化、差异化的物联网与垂直行业应用所需要的基础共性能力；而且，这些基础共性能力越开放，对物联网与垂直行业应用的支持度越好。

(4) 开放式5G网络架构的本质是确定5G网络中各要素的层次关系与接口，并采用开放标准或规范进行约束。

#### ● 为什么要建立开放式5G网络？

建立一张网络同时满足5G网络中的各种多样化差异化业务是不可能的。首先，5G网络的场景和业务需求具有多样性和差异性。目前，数以亿计的终端设备在各种场景下得到了应用促进了多样性的应用开发和各异性的通信需求的爆炸式增长。例如，5G网络的应用场景可分为三类，即提供更强带宽的增强移动宽带（eMBB）、为满足大规模物联网机器间通信的海量机器类通信（mMTC）和满足高可靠实时通信的超可靠低时延通信（URLLC）。国际电信联盟（ITU）在愿景报告中提出了5G网络的关键能力指标（KPIs）包括用户数据速率、峰值速率、频谱效率、能量效率、移动性、时延、链接密度和区域传输容量等。5G网络中的三种场景针对的通信对象和应用情景皆不相同，未来的运营模式和产业链也不相同，从而各场景下的KPI势必不相同。其次，支持各场景下各种业务的通信技术也不相同。例如，蜂窝通信、无线局域网中的WiFi技术、智能家庭中的蓝牙（Bluetooth）、紫蜂（ZigBee）技术等。最后，随着未来应用需求的不断变化和越来越多功能各异的设备部署到5G网络当中，其性能和服务需求甚至会变得更加的严格和多样化，上述的场景和关键性能指标不是固定不变的，而是不断发展变化的。因此，现有网络结构很难跟得上5G网络快速发展的应用场景、性能需求和通信技术，必须构建开放式5G网络，可为多样性的业务提供自适应、高效的个性化服务，以满足不同业务的需求。

#### ● 如何构建开放式5G网络？

目前，根据网络开放的程度，开放式5G网络的构建方式可以分为三大类：

(1) 网络能力开放：通过开放应用程序编程接口（API），为运行在Open5G网络中的第三方应用开放基础资源、增值服务能力、网络数据信息以及运营支撑等多种服务。这种通过开放观察接口和控制接口的网络，可以看做是一个“黑盒”开放网络。

(2) 半开放半封闭网络：通过向第三方应用开放网络中的部分子网，其灵活的模块化架构可具备高度的扩展性，可单独开发和升级网络组件，满足多业务需求。例如，面向服务端到端的原生云5G网络架构简化和开放了核心网的网络功能，为5G业务拓展带来更多可能性。这种部分开放的网络架构可被称为“灰盒”开放网络。

(3) 全开放网络：通过网络架构的模块化设计，打破网元的界限，将网络功能细分为服

务组件，向第三方应用开放。同时，在开放网络架构的基础上进行控制/应用软件的开源共享，网络服务的定制化、按需化和网络部署和运维的自动化。这种全网的彻底开放网络可被称为“白盒”开放网络。

目前，5G业务场景与需求、关键技术逐渐明晰，5G标准即将完成。然而，关于开放式5G网络的研究尚处于起步阶段。因此，迫切需要对开放式5G网络给出网络架构设计和解决方案、关键使能技术分析以及典型应用实例。本白皮书重点关注以下几个方面：

- 开放网络的基本概念
- 开放式核心网
- 开放式无线接入网
- 开放式终端侧
- 开放物理层
- 开放硬件
- 开放示例



## 2 开放网络的基本概念

### 2.1 开放网络基本内涵

开放网络的概念随着NFV和SDN的引入而成为了未来网络演进首先要面对和解释的概念。核心网基于服务的架构重组、无线网朝向集中单元（CU）/分布单元（DU）两级架构的C-RAN演进都是5G网络架构的显著特征。运营商期望通过虚拟化和云化带来的灵活部署能力、快速构建网络服务能力、以及网络功能快速迭代升级能力，可以在未来5G网络的运营中获得业务领域的拓展，不仅在传统的面向个人的移动宽带业务中保持领先，更要在垂直行业领域通过快速定制化网络能力分得一杯羹。本小节首先对运营商的技术演进需求进行分析，而后将开放网络的概念分三个层次进行阐述：能力开放的黑盒网络、完全开放的白盒网络、半开放半封闭的灰盒网络。这里需要强调的是所谓黑盒、白盒、灰盒开放的概念都是针对运营商而言的网络设备掌控度。针对设备厂商，则无所谓黑盒、白盒。

#### 2.1.1 面向 5G 演进的技术需求分析

##### ● 商业价值诉求

无线网络建设一直是运营商网络综合投资(TCO)的最主要部分，大致占比在60-70%。大部分运营商刚经历4G网络的巨大投资，就将面对5G网络的投资需求；由于5G网络“带宽大、频段高”等特点，势必造成单站设备成本高、建网规模大，这就需要引入新技术、新方案，避免完全采用传统建设模式（厂商为运营商提供全套软硬件设备），通过方案革新降低建设难度、减少无线网络的TCO投入。而且预计在5G网络建成后，由于高频段的引入，站址密度进一步



加大，相对应的运维难度和成本也将会大幅上升，这也迫切需要升级网络运维手段，降低综合成本。

同时，5G网络又是运营商必须投资的网络，其为运营商拓展垂直行业提供良好的技术基础。而在“无线互联网”流量收入增长放缓、语音收入下降的背景下，垂直行业是运营商必须进入的“蓝海市场”，拓展运营商的盈利能力将是5G网络的首要任务。垂直行业的新业务意味着更多样的业务类型、更复杂的网络管理，需要更高效的资源管理方案以及更灵活的网络架构以便于开展业务创新。

可见，面向5G网络，运营商在“节流”和“开源”两大方面有迫切的商业诉求。若完全依赖传统的采购、建设、运维的网络管理模式，不仅软件功能的更新上线速度无法满足需求，而且运营商更不可能深度掌控基础无线网络并实现研发运维一体化，快速响应灵活多变的上层业务需求。因此面向5G的商业诉求，就不可避免地催生运营商深度参与设备研发，一同构建无线开放平台和自主运维平台的诉求。甚至于通过“白盒化基站”、“无线大数据分析”等技术手段，创立运营商的核心技术能力，掌控无线网络核心组件的研发能力，这有利于增强行业的整体竞争力。

#### ● 资源共享需求

未来网络需支持超高带宽、超大连接和超低时延等多样化的业务需求，并且不单服务于个人用户，还服务于垂直行业，商业模式差异化显著。在此基础上，兼顾运营商网络投资和维护成本，未来网络云化资源共享需求凸现。运营商需要通过云化技术与通信技术的融合，进行处理资源、传输资源和频谱资源共享，从而达到节省资源、提高资源利用率和业务快速上线等目标。运营商通过网络NFV化可提升未来网络的弹性和敏捷性：一方面实现了软硬件解耦，降低成本；另一方面实现网络功能解耦和软件化，支持网络功能可编排和可定制。

基于SDN和NFV的新型网络架构已经取得广泛共识，是实现无线网络云化资源共享的重要承载方式。基于SDN/NFV的无线接入网络硬件、虚拟化层和软件分层部署，利用网络功能虚拟化基础设施（NFVI）的动态可变特性，根据业务需求可在不需要施工建设和软硬件开发的情况下进行网络架构和拓扑的动态调整。基于SDN/NFV的无线接入网络为人工智能（AI）的引入和移动边缘计算（MEC）的部署等提供了平台基础。

#### ● 深度定制的智能网管需求

未来网络引入多种全新技术，这导致网络变得更加复杂，同时，网络的可管理性及可运营性又是运营商的基本需求，这两者之间的矛盾使得智能网管及网优技术应运而生。

相对于现有网络，未来网络的网管及网优面临更大的挑战，这主要体现在以下几个方面：一是部署场景更加多样化，不同场景下参数配置及性能要求存在较大差异，网络规划将更加复杂；二是网络切片技术的引入，导致整个网络拓扑可以灵活调整，网元的参数可以灵活配置，网络拓扑管理及参数优化变得更加复杂；三是业务服务质量（QoS）保障粒度更加精细化，如何更精准的优化网络资源以匹配多样化的业务需求将是亟待研究的课题；四是不同类型网络之间互操作的增加，对不同网络间的协调提出更高要求。以上特性均对网络管理及优化带来了新

的挑战，传统的基于开环的人工干预为主的网管及网优手段已经不再适用，需要引入基于闭环的自动化控制手段来实现对网络的智能管理及优化，从而提高网络管理及优化效率，实现高水平的网络运营。

不得不提的是网络智能化管理的策略是因运营商而异的，不同运营商有不同的组网策略、部署条件、业务模型，因此智能化的网络管理将呈现深度定制的趋势。体现在NFV化过程上，就着重体现在MANO编排器的基于开源架构的自主研发上。

#### ● 跨制式的智能无线资源管理需求

为满足未来多样化的应用场景和通信需求，网络变得更加灵活，实时无线资源管理将变得越来越复杂。网络需要根据复杂的网络环境变化及应用需求，如信道传播环境变化、用户分布、用户业务等变化，自适应配置合适的传输参数，并实现空/时/频/码/信道等资源的合理动态分配，以保障业务所需的网络能力。

传统的无线资源管理方案将无法有效的满足未来5G 网络的需求。一方面，传统无线资源管理主要依赖于理论建模，面对日益复杂的网络/业务环境和海量的网络优化参数，传统的基于理论建模的方式可能难以对网络问题进行精确的描述，导致无线资源优化算法性能欠佳。因此要引入数据驱动的无线资源管理方法，利用机器学习等智能的方法，使用海量数据来刻画网络环境中各种变量间的真实关系，实现最大化的网络性能优化。另一方面，传统的基于瞬时状态信息的无线资源管理方案将难以充分的利用网络潜在的传播环境特征及用户行为规律带来的网络业务的时/空规律性变化特征，导致网络性能并未实现最优且存在大量的剩余资源未被充分利用。

另外，由于4G/5G将会在长期并存，最大化地利用两张数据网络的协同将会是长期目标，而由于4G和5G属于两个不同时间段建设的网络，同一区域内，4G、5G无线主设备很可能是来自于两个不同的主设备制造厂商。因此跨制式的协作将需要多厂商间的配合协调，给未来的组网带来了挑战。

基于此，可以看到在未来的网络演进中，有引入跨不同厂商的第三方无线资源控制器的需求，类似于交换网络的SDNC控制器，通过接口标准化，这个控制器需要与各个受控设备完全解耦，且它的算法优劣将对运营商的无线网络质量产生根本上的影响，运营商有进一步自主掌控核心价值的诉求。

### 2.1.2 能力开放的黑盒网络

能力开放可延伸为网络能力开放和资源能力开放。

网络能力开放，是通过公开API的方式为运行在平台主机上的第三方应用软件提供支撑服务。以MEC平台为例，无线主设备可通过API接口提供给无线网络信息、位置信息等多种服务，边缘应用第三方软件基于此类信息可更高效、更快捷地实现相关功能，如：广告定向推送、业务流量控制和降低关键信息发送失败等能力。而核心网的能力开放，则可通过API的方式提供给第三方应用，实现网络通信的定制化服务。网络能力开放仅仅是一类网络功能与上层应用间

的接口机制。

资源能力开放，是在引入NFV化后才出现的新概念，是对IT基础资源的管理、能力开放控制以及路由策略控制。其中，IT基础资源管理指基于OpenStack的虚拟化资源规划及业务编排，即传统数据中心的资源管理机制在通信领域的平台系统内的实现。管理开放控制包括平台中间件的创建、消亡以及第三方调用授权。路由策略控制指通过设定路由控制内的路由规则，对平台系统的数据转发路径进行控制，并支持边缘云内的业务编排。上层虚拟网络层（VNF）和NFVI层间的接口解耦是资源能力开放的关键。

这两个概念都没有脱离黑盒网络的本质。主设备均为制造商为主研发，而运营商通过推进周边接口的标准化实现功能和资源的开放。优点是与已有的商业模式冲突不大，行业公司易于接受，可满足云化资源共享的需求。缺点是需要接口的解耦测试，运营商自主掌控网络的能力不强，故障定位等维护工作容易出现协调困难。

### 2.1.3 完全开放的白盒网络

完全开放的含义针对软件和硬件功能有不同的解释。

针对软件，可解释为运营商研发的软件功能，可完全自主研发，也可基于开源社区代码的二次研发。前者的研发投入较高，对于运营商的技术转型要求较高。后者的研发投入可控，对于运营商的技术转型要求较低。典型案例：OTT厂商基于OpenStack开源社区，自主研发实现完全开放的私有云业务。

针对硬件，可解释为网络功能硬件的完全白盒化参考设计，基于此设计，ODM厂商可快速制造大量廉价、通用的硬件，降低硬件设备的采购成本。典型案例：FaceBook的OCP项目，在硬件开源、开放上获得了巨大成功，为参与其中的成员公司提供了廉价的数据中心硬件服务器解决方案。

完全开放的白盒网络意味着打破传统的商业模式，运营商需要掌握设备软硬件的核心研发能力。传统的设备制造商将受到最大限度的挑战。优点是运营商可掌控网络的核心技术，可快速响应上层业务的需求实现迭代式研发运营一体化，避免故障定位时的推脱，并降低设备的采购成本。缺点是打破了传统设备制造商和运营商的既有格局，对运营商的技术储备和转型要求高。若采用开源策略，除运营商自身的参与意愿外，无论既得利益的大厂商、还是新进的小厂商均没有直接参与开源软硬件工作的动力。白盒化网络的推进难度和阻力相对最大。综合考虑收益，建议在运营商最核心的重要技术领域采用完全白盒化自研策略。

### 2.1.4 半开放半封闭的灰盒网络

半开放半封闭的灰盒网络，是在白盒网络和黑盒网络中间的折中。运营商在设备深度参与设备研发，联合设备制造厂商深度定制网络设备产品。网络设备产品的软硬件，部分由厂商研发，部分由运营商主导私有研发，整体集成为满足运营商定制化需求的软硬件设备。



灰盒网络是对原有商业模式下的创新。由于运营商需要深度参与设备的研发，最大的难点在于运营商如何与设备商联合研发设备，包括：合作协同的策略、研发侧重工作内容的划分、功能模块间接口的定义，需要一定的创新能力推进。

目前业界没有非常成功的灰盒网络的典型案例，但在MANO编排器的领域有可能实现灰盒网络设备的研发合作。以MANO编排器的ONAP社区为例，中国移动、ATT均已深入参与代码的定制化研发，且华为、中兴、爱立信等传统主设备厂商也积极参与了相关项目的研发。编排器的开源社区，给了运营商和设备制造商一个合作研发的开放平台。运营商参与开源社区的代码开发，确保ONAP的代码框架的研发方向满足运营商的需求。且运营商基于开源社区的代码同步进行私有开发，完善编排器的核心功能模块的研发。如：编排器策略等。而设备制造商基于ONAP的开源框架可以快速研发兼容运营商核心模块研发的商用编排器软件模块，实现对主设备的完美兼容管理。基于这种模式混合研发出的编排器软件。将带有一定的灰盒特征：最终的商用软、硬件产品混合了各方的研发成果。在功能验证保证阶段，利用社区的优势，运营商和设备制造商可以共同定义测试用例，对开源版本进行完备性测试，为基于开源的商用版本研发提供测试支撑。优点是运营商深度参与功能研发，可以采用研发运营一体化的策略，定制化研发核心功能组件，快速满足上层多样化的业务要求，且通过合作共赢运营商、设备商均可以找到自身的商业价值。而缺点主要体现在，局限在基于通用硬件平台下的软件功能研发领域，嵌入式开发等软硬耦合设计的情况下，不易于引入这种模式；模块及对接完整测试保证的要求较高，在社区需投入大量的资源建立完善的测试平台。当然上述的讨论是完全是基于理念上的设想，还需要在后续的探索中进一步付诸实践，切实找到产业界多方合作共赢的方式。随着网络NFV化的进一步深入，被云化、虚拟化的网元场景增多，采用灰盒的方式进行研发的场景将会越来越多。以无线网为例，目前3GPP已经确定采用CU/DU两级架构，而CU作为一定区域内的控制锚点和业务分发锚点，有引入NFV进行云化的趋势。而从增强核心竞争力的角度来说，运营商参与CU无线控制器功能的研发，将使得运营商获得更强的网络自主控制力，基于无线网资源管理策略引入人工智能方法后可提升无线资源分配的效率和用户感知。

## 2.2 开放网络架构的总体目标

开放网络架构首先要明确目标场景，并依据目标场景的特征，从能力开放的黑盒、完全开放的白盒、半开放的灰盒三种可能的方案中进行选择。因此在描述开放网络架构的总体目标前，需要先阐述影响开放策略选择的因素：

（1）研发成本因素。若网络设备研发成本占设备整体成本的比重较高，多家公司采用白盒开放方式，将降低软硬件的设计研发成本。并最终降低整体设备成本。

（2）运营商定制因素。部分软硬件功能研发具有运营商的特殊属性，需要针对不同运营商的定制，而定制工作会造成设备成本的上升。运营商定制化功能与已有功能的融合可采用灰盒方式。

（3）网络运维因素。对与可靠性要求较高场景，则需要设备黑盒或者纯白盒自主研发实



现，由单一厂商负责设备的完整可靠性。对于运维要求不高，或处理性能要求不高场景，则可采用灰盒模式，最大化发挥厂商间分工协作。

(4) 分层协作因素。若厂商间的合作模型以分层解耦形态存在，则以黑盒方式开放能力，定义API解决协作方案。若厂商间工作耦合度高，不易于实现接口的清晰定义，则采用白盒、灰盒方式为宜。

在5G网络架构中定义网络切片和服务化架构，标志着5G是一个对定制化业务灵活需求非常友好的新一代系统。开放式架构，在此基础上更进一步。

提供开放式架构本质的目的是以需求发展为导向，使网络能力提供者与解决方案提供者分离。通过开放式架构，使前者能够将有限的资源，更有效地投入到系统架构设计、使能技术研究以及提高系统运维优化能力的创新上；使后者能够以提供应用和服务为核心目标，降低解决方案对底层技术细节的依赖，降低应用、服务创新的技术成本，进而促进服务的创新。

开放式架构本身并不是设计来直接产生经济价值，而是（在其生命周期里）提供一个分工明确，焦点清晰，对服务创新和技术优化均友好的生态环境。

开放式架构可以应用于技术创新、运营创新、应用创新三类场景中。在技术创新的场景中，开放式架构为构建概念验证（Poc）原型提供丰富的要素集合；在运营创新的场景中，开放式架构提供了一种兼顾灵活性与标准化的解决思路；在应用创新的场景，开放式架构针对垂直行业应用提供了一致的，稳定的开发环境和测试验证平台。

## 2.3 SDN/NFV

SDN/NFV是5G网络的核心使能技术，引起了5G网络颠覆性的变革，为实现网络重构提供了技术支撑，使5G网络进入软件化、虚拟化的新阶段。其中，SDN提供网络功能的全网统一控制，解耦网络控制面和用户面，降低了5G网络的部署、升级和管理成本。NFV通过虚拟化技术，解耦网络软、硬功能组件，促进了网络资源更为灵活的调度和更为深度的共享。SDN和NFV相互独立却又相互补充，NFV负责各种网元的虚拟化及灵活部署，而SDN负责网络资源的集中调控并弥补NFV资源分配及业务自动化部署问题。

SDN/NFV技术在核心网率先得到了技术方案的实现，如3GPP的SBA架构。然而，由于无线应用场景的多样化、业务需求的动态化、网络的异构化以及技术标准的碎片化，SDN/NFV技术在无线接入网的解决方案尚需进一步的研究和发展。例如，SDN的控制方法无法直接应用到无线网络当中。具体而言，由于无线环境的复杂性，无线网络的描述涉及到了大量的物理参数，如频率、带宽、调制方式、天线模式等等，这远比有线网络参数更为复杂。在核心网中，利用NFV技术可较为容易的在硬件上进行资源的抽象和隔离，而由于无线通信的广播特性和无线信道的时变性，无线资源的抽象和隔离将会变得异常困难。

SDN/NFV技术实现了5G网络的软件化和虚拟化，为实现端到端业务编排提供了技术基础，进一步提高5G网络的灵活性。针对传统网络模式运行单一的问题，基于共享的物理基础设施，利用SDN/NFV等创新技术，灵活地调配资源、编排网络功能，可组建定制化的端到端网络切

片，包含核心网和无线接入网。每个网络切片可视为一个逻辑上独立的虚拟网络，通过对切片的资源最优化管理，可适配某类特定物联网（IoT）业务或垂直行业需求，从而赋予了Open5G网络针对业务特性灵活定制的属性。

### 3 开放式核心网

传统蜂窝核心网依赖专用的网元设备，完成包括移动性管理、会话管理、认证安全、计费等一些列核心网功能。不同的功能承载在物理上独立部署的核心网网元上。2G的核心网主要面向电路域的支持，3G开始添加了数据分组域的考虑，4G是一个全分组网。4G时代，网络进行了控制面MME和用户面SGW/PGW的分离，进一步地，伴随SDN/NFV技术的发展，4G核心网络一方面推进基于SDN考虑的CUPS（control user plane split）技术，另一方面，尝试通过NFV技术来承载网络功能。同时，为了满足多样化的数据传输场景需求，核心网提供了场景专用核心网Décor/eDecor概念。

3GPP 5G SBA架构则是基于4G核心网增强技术的全面变革，一方面，网络平台虚拟化成为共识，传统的网元概念淡化。标准化上，逻辑功能标准化，替代了传统的网元标准化；不同的逻辑功能通过互联网传输协议实现功能衔接，核心网控制面协议从4G的GTP、Diameter、SCTP演进到5G的HTTP/2、TCP协议。在核心网基本功能逻辑设计上，彻底实现了控制和转发的分离：除了4G时代的移动管理和会话管理锚点的分离，会话管理和会话转发功能也进一步分离；相同的会话可以经由路由网关转发给多个不同的用户面网关，包括集中部署的用户面网关和边缘部署的用户面网关，能够支持MEC本地路由功能；在业务服务能力上，网络整体架构支持基于端到端网络切片的网络功能逻辑和网络部署的定制，能够自适应满足不同业务和会话场景需求，支持网络切片成为运营商满足垂直需求的一种服务。

越来越多的企业迫切需要移动通信技术应用到办公、生产、运营等环节，从而大幅度提高企业的生产与运营效率。但是，受制于频谱资源的稀缺、昂贵和严格管制，绝大多数企业很难获得授权频谱。如何打破频谱资源的限制和瓶颈，帮助企业建设适用于自身业务需要的通信网络成为亟需解决的问题。另一方面，传统的核心网络都是面向百万甚至千万用户设计的，设备的能力与功能存在冗余，价格也非常昂贵。而众多企业在特定地点的人数一般都远小于1万人，甚至在几十人的规模，同时各行业和大多数企业希望自己保存自己的数据。目前，完全基于免授权频谱的MuteFire标准已经制定完成，基于MuteFire基站和开放式核心网可以构成一个完整的企业级解决方案。各企业间的办公、生产、运营流程差异非常大，第三方网络设备、软件和应用提供商可以根据企业需求，对开放式核心网功能和能力进行裁剪或增材。

传统蜂窝系统是信息与内容传输的管道，这也造成传输与内容在逻辑距离与物理距离方面的不一致，目前的解决方案是大量部署内容分发网络（CDN）。当然5G网络架构的扁平化、缓存和边缘计算能部分解决这两方面的冲突。由于内容与应用基本都部署在互联网上，分布式的网关与用户扁平可以缩短传输路径及时延，但不能从根本上解决传输与内容在逻辑距离与物理距离方面冲突；另一方面，由于控制的集中，导致控制平面、认证和计费等的集中，也将导

致相关交互流程时延的加大。开放式核心网络可以采取分布式安全、分布式控制和区块链等分布式手段，从而使整个核心网架构更加开放；在具体实施方面，可以采取借鉴迭代开发的方式，实现类似IT的快速更新。从而建立以信息和用户为中心的移动信息服务网。

## 4 开放式无线接入网

### 4.1 Open-RAN ( ORAN ) 开放式无线网络概述

无线网络的开放，随着3GPP确定了CU/DU架构，且产业界逐渐认可CU采用云化实现(NFV化)，其概念逐步清晰。针对RAN网络的不同部分，开放有着不同的含义，也有着不同的挑战与机遇。

- CU部分：采用NFV实现，引入NFVI开放平台，承载CU协议栈软件、智能控制单元和第三方MEC应用。
- DU部分：沿用传统BBU架构，但须确保周边接口的开放，如：F1和eCPRI等
- RRU部分：采用白盒的参考设计，引入更多的制造商，依靠硬件的通用化降低设备的平均设计制造成本。

### 4.2 开放的 CU 提升行业竞争力

#### ● CU平台的能力开放

开放式无线接入网平台的使能技术包括MANO功能扩展、NFVI增强等。传统的无线网络基于单接入制式，较少业务种类和有限扩展能力已经无法满足未来无线接入网络发展的需求，需要进行重构设计。未来无线接入网的网络功能设计技术挑战在于既要满足基本功能/性能，又要满足多维度的灵活性需求。比如，支持网络功能的按需灵活部署、网络能力的弹性伸缩和新接入制式的快速引入，以满足未来无线接入网业务多样化和场景多样化的需求，使能新业务的快速上线。

RAN-NFVI是服务于无线网络功能虚拟化的NFV平台的简称，通过虚拟化层完成对硬件资源的抽象，形成虚拟计算资源、虚拟存储资源、虚拟网络资源和虚拟加速器资源。为满足无线网络功能、边缘计算、核心网功能和人工算法等上层无线相关应用需求，RAN-NFVI需要增强网络性能，实时性能、高精度时钟性能和不同虚拟化技术兼容性能等。另外，还需进一步实现硬件层、虚拟化层和虚拟化网络功能软件三层解耦，得到针对共享统一的虚拟资源池。面向5G CU的更高吞吐量需求，通用平台数据分发效率和性能功耗比还有待于进一步提升。由于现网机房的空间和功耗的约束限制，也还需进一步定义通用设备的硬件形态和规格要求。

RAN-NFVI的重点技术方案包括：

(1) Linux系统级调优：为了满足实时性需求，RAN-NFVI使用的所有linux操作系统均使用的是针对电信运营商开发的实时性操作系统及虚拟化层，同时辅以CPU核绑定，CPU亲和性，



CPU核隔离,大页内存等相关技术,以保证所有的RAN侧业务能在规定时间内高效无误的完成。

(2) 网络调优: 为了保证RAN-NFVI平台中的数据包传输时延抖动满足无线侧的需求,RNA-NFVI平台引入了DPDK, SR-IOV, OVS+DPDK等网络传输技术, 这些技术将原来毫秒级的网络数据包处理时延提升到了微秒级。

(3) 硬件调优: RAN-NFVI的硬件平台也针对实时性做出了相关调整。首先, x86平台的服务器BIOS会针对实时性有一些定制化的修改以确保硬件的处理速度。其次, 考虑到部分网络加速技术是以牺牲计算资源为代价来保证传输性能, 会有大量的非业务计算资源损耗, 造成整套平台整体功耗的提升, 为了避免此问题, RAN-NFVI引入了加速器来处理特定的任务, 如: DPDK网络加速, 协议栈PDCP层加解密算法等, 通过卸载这些任务来降低平台整体功耗。

NFVI为网络功能动态调整提供了基础, 编排和管理系统旨在不需要施工建设和软硬件开发的情况下可完成网络功能的动态调整, 以及配合策略提供运营商特色的差异化服务。网络编排和管理以运营商面向业务的编排为起点, 各模块可以基于大数据搜集及分析由预定义策略自动化驱动管理系统。业务编排向下可分解为NFV、3GPP和SDN三个领域内容。基于ETSI MANO标准研究无线接入网CU所在数据中心资源编排和管理需使用及扩展的内容。如管理NFVI因RAN侧需求扩展的增强的平台感知、加速器和容器等。基于3GPP网管标准研究基于NFV的无线接入网络CU和DU管理需扩展的内容。RAN由CU VNF和DU PNF(Physical Network Function)等共同构成, 扩展管理的目标是使得不属于NFVI且不能被VIM管理的PNF支持配置管理和业务的“轻度编排”。最后, 还需考虑在RAN NFV化过程中涉及的SDN编排需求和网络管理扩展。如引入SDN技术来管理和控制CU和DU之间的物理网络, 以及在CU机房中的虚拟和物理网络, 以提高网络的可编程性和灵活性。

#### ● CU软件的开放性

CU-DU架构为智能实时无线资源管理提供了基础和平台支撑, 基于CU-DU架构无线资源管理可以进一步基于大数据和人工智能算法进行优化。为此, 可引入RAN侧的大数据分析

(RAN Data Analytics) 逻辑功能, 该功能主要用于支持RAN侧基于数据驱动的智能实时无线资源管理, 具体包含无线大数据的采集/预处理, 大数据分析和预测/决策模型训练, 模型的执行, 策略的生成和配置及数据特征/模型的订阅和分发等功能。该逻辑功能应与目前的控制面和数据面存在交互的接口, 实现所需数据的采集及策略配置。

RDA是一个逻辑功能, 基于CU/DU两级逻辑网络架构, RDA可以划分为CU侧的大数据分析功能(CUDA)和DU侧的大数据分析功能(DUDA)。CUDA侧重于大数据分析和预测/决策模型训练、模型的执行、策略的生成和配置及数据特征/模型的订阅和分发等, 主要应用于RRC、SDAP、PDCP等层相关技术点和过程(如: 多连接、干扰管理、移动性管理等)的优化。DUDA侧重于无线大数据的采集/预处理、模型的执行、策略的生成和配置及数据特征/模型的订阅和上报等功能, 在CUDA的协助下DUDA主要用于MAC调度及物理层相关过程的优化, 并为CUDA提供可能需要的预处理后的数据特征, 供CU做相关大数据分析和模型训练。

另外考虑MEC与CU协议栈共平台部署。CU可实现网络状态信息开放, 通过公开API的方



式为运行在MEC平台主机上的第三方MEC应用提供包括无线网络信息、位置信息等多种服务。对其而言，应综合考虑第三方应用平台在系统架构及业务逻辑方面的差异性，实现网络能力的简单友好开放，还应保证网络能力的开放具有足够的灵活性，随着网络功能的进一步丰富，可向第三方应用实现持续开放，而不必对第三方平台及网络系统自身进行复杂的改动。

基于上述分析，RDA是未来运营商网络能力提升的核心，而MEC又是运营商运营模式转变的根本。考虑相关功能具有运营环境的特色属性。因此亟需运营商自主掌控。这就造成了CU软件的开放一定要以软件本身的接口开放、甚至于开源开放为前提。因此建议CU软件的开放以灰盒开放为主。运营商与设备制造商采用混合联合研发的方式促进CU的开放性。

### 4.3 开放接口的 DU 提升网络性能

CU/DU架构下，业界逐渐达成了CU作为跨制式锚点的共识。CU作为4G/5G等不同制式的公共锚点可支持多制式间的协作，包括：双连接配置、负载均衡、切换优化等功能。而已有的4G网络为确知的厂商，而5G网络的部署将可能在同区域内引入异厂商。从而造成4/5G设备间协同的需求发生于异厂商间。另外，CU放置的位置较高，也容易出现同一CU映射的区域内存在异厂商DU的场景。因此，CU与DU间的F1接口是需要开放定义的。

除F1接口外，DU与RRU/AAU间的接口也有进一步标准化的需求。传统CPRI承载的是IQ数据，而随着3D-MIMO等大规模天线阵技术的引入，DU与RRU间的功能进行了重构，部分物理层功能移至RRU实现，通过标准化其间接口，统一RRU内器件的需求，有利于进一步引入专有处理芯片，降低RRU的处理功耗。

### 4.4 白盒化的 RRU/AAU 降低成本

从目前无线主设备的综合成本分布来看，RRU/AAU所占比例较高。而成本的核心又是RRU的设计成本和器件成本。若通过共享设计的方式，则可降低RRU的准入门槛，分摊设计成本。同时，也可因器件的通用化，而通过“数量”分摊单器件的基本成本，达到一定程度的通用化。因此采用纯白盒的方式推进RRU的开放，将是我们重点探讨的方式。面向5G，由于未来高频段的引入，站址数量和RRU数量将随之成指数上升。统一业界的RRU设计，形成模块化的RRU硬件设计，将会让更多的厂商收益。从而达到分摊单价成本，繁荣产业的目的。

## 5 开放式终端侧使能技术

### 5.1 开放式终端侧的内涵与外延

开放式终端的定义应该包含两个层面：第一个层面从设备能力的角度进行定义，第二个层面是对开放的角度进行定义。

由于终端与应用场景需求具有强相关性，因此不同应用场景下的设备，不论是形态、工作

指标、工作方式都将千差万别。但是，不失一般性，从设备能力的角度上看，开放式终端必须具备与网络或其他设备进行通信的能力。

在另一方面，从开放的角度进行定义，开放式终端包含了针对自身能力的开放和针对网络能力的开放。

支持设备自身能力的开放包括支持开放的硬件架构和开放的软件架构。例如：

(1) 硬件架构支持第三方自由地通过改变硬件配置，满足不同场景的指标需求，如针对URLLC场景，提升计算处理能力；针对eMBB和Massive IoT场景，满足不同频谱资源条件的需求；

(2) 硬件架构和软件架构支持对终端的逻辑功能和/或信息处理过程进行全部地重新配置。如：针对低时延、高带宽业务，变更物理层处理方法，针对不同应用场景更改底层、高层协议栈。

(3) 具有一定的容错能力，即在优先保证实现新配置的前提下，提供避免或解决逻辑功能和处理层面冲突的处理机制。例如：在允许修改的调制方式范围内，需要有对应的解调方式提供修改和选择；允许使用自定义的编码器的同时，也必须具备使用自定义的译码器的能力。

特别的，针对1、2中的描述，如果仅允许第三方自由地进行“部分”而非全部重新配置的情况，可以将其定义为“部分”开放自身的能力。

其次，开放式终端还支持在网络中开放其能力，具备将自身抽象为网络中的资源的能力。例如，在近来兴起的开放雾计算（OpenFog）思想的指引下，开放式终端的涵义被进一步延伸。在开放雾计算架构中，开放式终端将充分开放各自的计算、存储、通信等资源，与其它开放的雾节点（包括终端、接入点、云服务器等）一起形成资源共享的共同体，并根据不同应用场景的需要，灵活地调度和分配各项资源，从而进一步提高整个网络的资源利用效率，降低网络负载和时延，改善用户体验。

利用（部分）开放式终端，可以进行如下的应用，包括但不限于：

(1) 能够在不进行重新配置的情况下，实现与需求场景相对应的终端功能；

(2) 能够在一定操作范围内，根据需要，实现对终端部分甚至全部能力的调整，以满足研究、应用的需要。调整的形式不限，例如：可以基于预设的不同的配置方案直接进行；可以采用自由配置的形式；可以采用自定义的新模块替代原有模块等等。

(3) 能够与邻居开放式终端（比如开放雾节点）共同形成一个动态的按应用需要可实时灵活配置的“雾计算域”，对域内所有成员开放计算和存储资源。

## 5.2 开放式终端侧使能技术

业务的千差万别，导致不同类型的应用场景对终端需求的极大差异性。例如，在eMBB场景中，需要终端支持高吞吐量、大带宽传输，并且支持高移动性下的业务连续性；URLLC场景中，需要终端支持1毫秒的端到端时延、极高的处理速度和传输可靠性，但是对带宽和速率没有显著要求；在Massive IoT场景中，对电池寿命、通信过程的鲁棒性有较高的需求，但是对

速率、时延等要求较低。

即便是在同一类型的应用场景中，不同的应用对终端的需求也有很大区别：例如Massive IoT场景中，用于广域环境监测（如森林防火）和用于室内环境监测的终端设备，在能耗、传输能力方面的要求相差是十分巨大的；eMBB场景中，中低速移动应用和高速移动应用采用的技术方案也有差别，需要终端的支持。

在支持端到端切片的网络中，可以将需求迥异的应用场景和业务需求通过不同的切片来实现同时部署，并且不同的切片之间可以做到端到端全部隔离，便于运维。因此，对于需要支持多种应用和业务的终端，则需支持从物理层到应用层，从硬件到软件的开放和可重配，以完全适应不同业务应用（切片）的需求。

因此，提出一种开放式终端的架构，其包括三个层面：开放的软件资源架构和开放的硬件资源架构，以及独立抽象的开放配置管理层。

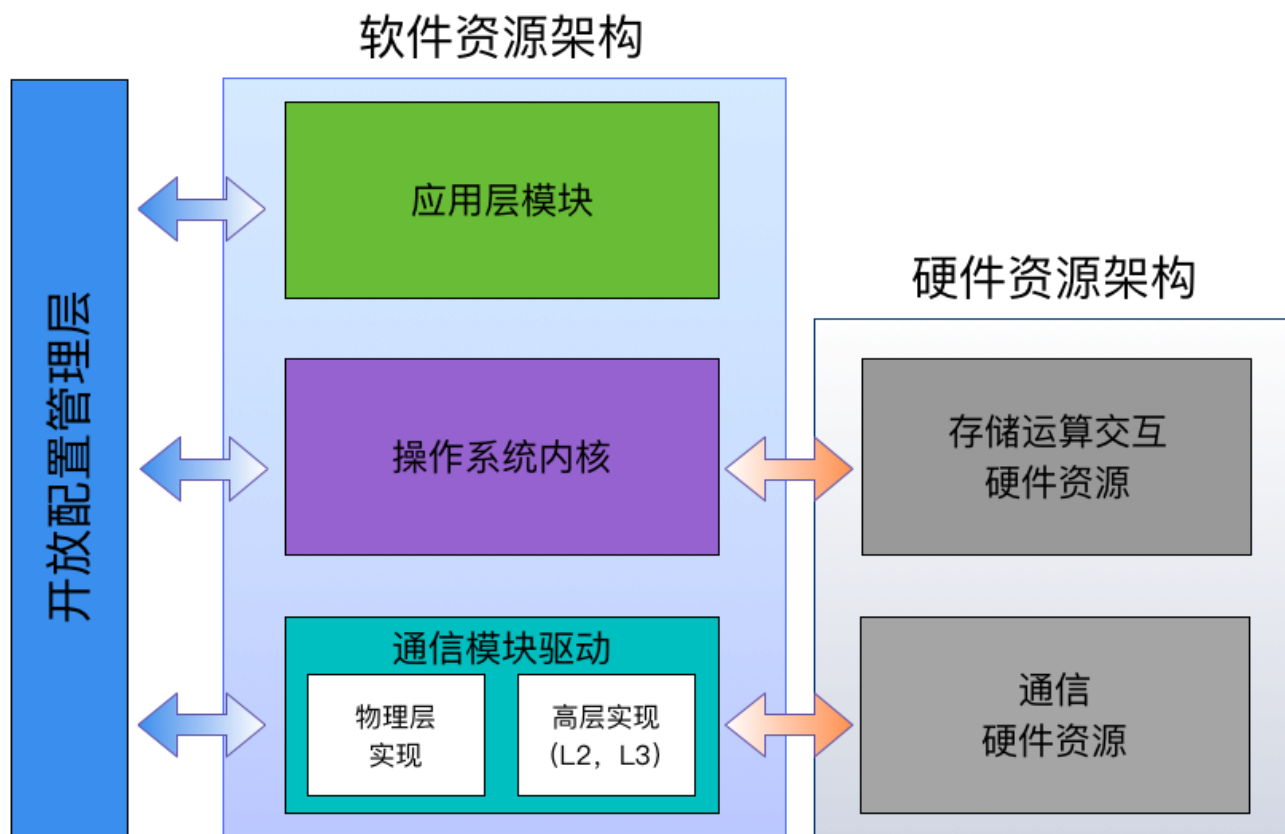


图 5.1 开放式终端的架构

开放的软件资源架构包括：

- (1) 应用层模块：用于完成应用层面的业务逻辑
- (2) 操作系统内核：由于控制和调度计算、存储资源、交互资源，并提供面向应用层的接口
- (3) 通信模块：通信网络终端侧的协议栈，并控制通信硬件资源，完成所需的空口操作。

开放的软件资源架构的关键技术挑战有两个方面，第一方面是可重配的能力。软件资源架

构需要通过合理有效地抽象，实现软件功能的解耦，从而满足可重配和可扩展的需求，并保证不同模块间的兼容性；另一方面软件资源架构需要保证对资源使用的效率。时延敏感型或实时业务以及针对大带宽、高速率的业务，需要终端的软件部分能够在非常有限的时间内完成大量的运算、存储操作。这不仅要求软件资源架构支持利用诸如多线程、多核等方式，提高其对运算存储资源的访问使用效率，实现对单一的软件模块的优化；同时，架构也需要支持跨模块的联合配置和优化，例如对模块间的负载进行均衡，避免资源浪费。

开放的硬件资源架构包括用于通信的硬件资源和用于存储、运算、交互的硬件资源。为满足不同业务需求对端到端时延、带宽、频带等需求，通信硬件资源应具备SDR或软件定义空口（SDAI）的能力，以通过软件定义的方式对数字基带信号处理和射频部分独立地进行配置和控制。此外，开放的硬件资源架构支持将各种硬件资源进行抽象和封装（虚拟化），从而可以将终端的能力在网络进行开放。

开放配置管理层提供对终端软件能力以及硬件能力开放的统一管理。通过该层，一方面可以为针对单个终端的软件和硬件能力的重新配置和部署提供统一的入口；另一方面，可以通过该层直接访问终端的软件能力或者虚拟化资源，从而将终端的能力开放到网络中。以开放雾计算（OpenFog）架构为例，为了实现开放式终端间的资源共享和灵活调度，开放式终端的开放配置管理层应提供以下功能：

- （1）邻居发现：通过邻居请求与响应的方式，发现网络中的其它开放式终端；
- （2）资源发现：通过资源请求与响应或资源广播的方式，实现开放式终端间的通信、计算、存储、资源的信息交互；
- （3）资源协调：通过集中式或分布式的资源协调，实现开放式终端间的协作式任务分配与资源共享；
- （4）节点分组：将多个开放式终端进行分组形成域，为每个域配置不同的功能和安全、服务、管理策略，用于满足不同应用服务的需求。

## 6 开放物理层

### 6.1 开放物理层内涵与外延

Open5G网络的虚拟化决定了开放物理层的虚拟化，这意味着其概念已经不局限于传统的物理层。开放物理层是开放网络架构下端到端网络切片的基础，是以用户为中心的面向服务的虚拟切片。在开放物理层中引入SDAI，可以广泛应用于复杂的异构网络（HetNets）场景，其灵活可配的特性赋予了开放物理层自组织、自进化能力。此外，由于5G通信网络的异构和动态，应用的多样和多变，开放物理层需要引入人工智能技术，使其具备智能的自主处理能力。Open5G物理层的开放方式为，外部通过开放接口来支持端到端的网络切片，内部通过软件定义的空口接口，包括SDR引擎，可编程射频等来进行资源的切分、分配和配置，从而通过开放接口提供虚拟的空口接口服务。



实现上述的开放物理层，需要解决好虚拟化的问题，如何使物理层全面融入和支持虚拟网络架构和网络切片，如何解决虚拟化物理层在网络层次中的映射关系等都是关键问题。全面可编程的软件定义对计算处理的速率有非常高的要求，模拟和数字的转换速率是其能力发展的瓶颈。在网络问题中，要使开放物理层对基站、路由等进行角色分配，需要解决中心与本地间的计算和存储的平衡关系。另一方面，引入人工智能技术会增加成本和复杂度，有过度冗余的风险。

开放物理层旨在提供面向场景的多种服务，除了赋予传统的通信服务更好的用户体验外，也应该支持面向未来的以用户为中心的沉浸式智能化信息服务，比如智能家庭、智慧城市、智能交通、智慧医疗等全方位的信息服。在下一代的网络架构和基础架构中，通过引入机器学习等人工智能技术，使开放物理层具备智能感知和智能处理的能力，进一步为用户提供面向不同应用场景的智能化服务，比如大数据、情景感知、SDN、定位、存储等用户化的定制服务。

## 6.2 开放物理层框架

5G的万物互联、万网融合面临着网络容量急剧增长的需求，在这种情况下支持多种频段、多种网络制式、多种结构的层次化网络架构可以有效提高网络容量，但同时这种HetNets会带来复杂的网络动态变化。不同需求、不同场景、不同技术之间需要开放物理层进行协调，组成协作的异构网络。5G的开放物理层需要实现端到端的网络切片，这将颠覆传统物理层结构和功能的概念，而是作为5G虚拟化网络架构中的虚拟切片，以用户为中心提供面向场景的服务。

在异构网络的协作中，对于工作在授权频段和非授权频段的多种无线通信标准，开放的物理层应该能够支持不同的工作频段和通信协议之间的转换，这使软件定义和可编程成为开放物理层的关键理念。另一方面，面对复杂多样的场景、需求和应用，开放物理层需要具备智能感知和智能处理的能力，可以进行场景感知并做出智能的反馈。在灵活动态难以预测的通信网络中，机器学习等人工智能技术可以为开放物理层创造更多的可能性。

基于SDR和SDAI技术，提出一种5G的开放智能物理层架构，如下图所示：

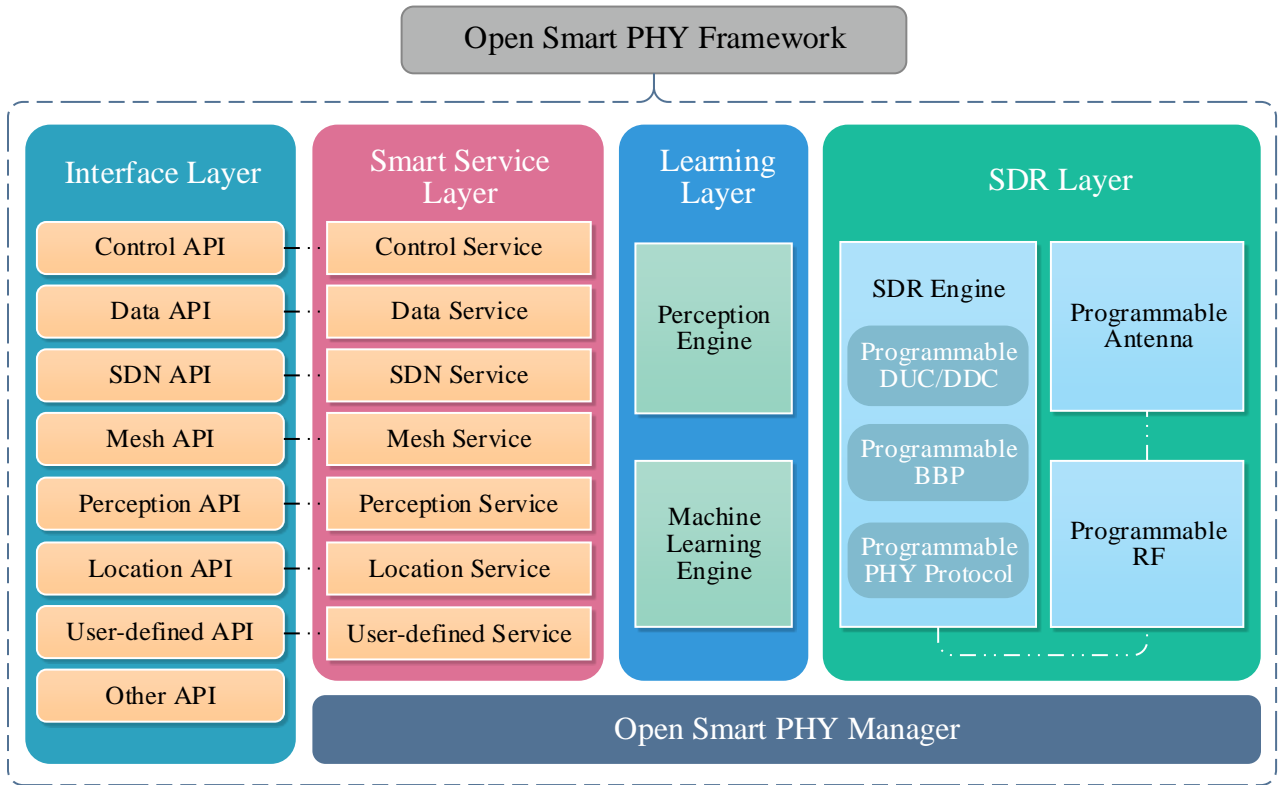


图 6.1 开放智能物理层架构图

所提出的开放智能物理层架构包含软件无线层、感知学习层、智能服务层和接口层，以及跨层的开放智能物理层管理器，作为控制管理中心负责各个层次模块之间的协同工作。开放智能物理层通过开放接口来对端到端的网络切片提供底层服务，其SDR引擎控制下的软件定义空接、可编程射频、可编程天线可以对频谱资源进行分配和配置，从而提供虚拟空口服务。

#### ● 可编程SDR

SDR层引入了SDAI灵活可配置的思想，由可编程SDR引擎、可编程射频前端和可编程天线组成，即所有的物理层底层模块都是可编程的。其中SDR引擎包括可编程上下变频、可编程基带处理和可编程物理层协议，可以由可FPGA、DSP和SoC实现。

可编程的SDR层可以支持集中、分布或MIMO等多种天线模式，灵活使用频谱，自由选择调制和编码方案以及多址、双工方式，根据通信环境使用合适的通信协议，对于eMBB、mMTC和URLLC等场景进行自适应优化。可编程天线允许从形态、参数、结构、数量等方面进行天线配置，结合可编程射频前端，SDR引擎可实现通用的接口来提供各种射频服务。

#### ● 感知与机器学习

感知学习层包括两个引擎，感知引擎和机器学习引擎。

感知引擎主要实现对外界频谱环境和信道状态等外部信息感知，传统认知引擎的学习和反馈功能转移到机器学习引擎。具体感知的内容有信道、环境和场景等等。机器学习引擎通过学习感知引擎的数据，反馈到软件无线层，可对通信网络的结构、吞吐量、时延、能耗、资源分配等进行配置和优化。此外，机器学习引擎可以用于大数据、情景感知、用户个性化预测、

定位、路由等具体算法，实现智能感知和智能处理。

### ● 智能服务与开放接口

基于SDR引擎、感知引擎和机器学习引擎，智能服务层可提供以用户为中心的多种智能服务。包括普遍的控制服务和数据服务，特定的SDN服务、Mesh服务、感知服务、定位服务、D2D服务，以及用户自定义的服务，所有服务通过接口层向用户开放。此外也提供允许用户自定义的服务和对应API。

控制服务和数据服务对应于传统的控制面和数据面，其服务内容可根据5G的应用场景进行扩展。SDN服务使用户可以自定义任何想实现的网络路由和传输规则策略。Mesh服务实现在适合的情况下Mesh组网，增强网络的灵活性和稳定性。D2D服务是5G终端协同通信的关键技术，近距离的通信设备以小组形式内部通信可以有效降低网络时延、提高吞吐量和能量效率。

所提出的开放智能物理层架构具有以下特点：

- (1) 具有全可编程能力的软件定义物理层；
- (2) 具有射频感知和理解的物理层机器学习系统；
- (3) 具有射频即服务（RaaS）的通用接口；
- (4) 全面支持以NFV/SDN为核心网、C-RAN为接入网的无线虚拟网络。

## 6.3 需求与技术挑战

开放物理层作为5G通信网络的底层，需要支持NFV/SDN核心网和C-RAN接入网，以虚拟化的特性实现端到端的网络切片。既要满足5G高容量、低延迟、高能效的需求，又需适应eMBB、mMTC和URLLC的5G主要场景，同时还要支持其它以用户为中心的定制化服务。这不仅需要开放物理层具有灵活动态的特点，还需要具备智能处理的能力。从实现的难度和复杂度上，开放物理层面临诸多技术挑战。

开放物理层所提供的智能服务的实现基础是可编程SDR、射频感知和机器学习三大技术。

SDR是模拟和数字的交互层，这对模数转换器（ADC）和数模转换器（DAC）的转换速率有非常高的要求，换言之，这二者转换速率的上限就是SDR的能力瓶颈。对于全可编程的SDR，各个模块可编程化的实现复杂度都很高，硬件体积和软件效率之间往往相互制约，如何权衡和突破是个问题。

对于射频感知，虽然认知无线电（CR）技术正在快速发展，但是5G应用中的射频感知不会仅限于频谱的感知，为了提高场景感知、情景感知、定位等的范围和精度，不仅对感知的参数指标有更高的要求，还需要结合更多维的传感方式。

机器学习技术的引入，一方面会带来算法复杂度的大幅提升，另一方面由于5G通信应用场景复杂，对于每一类问题选择对应的合适有效的模型非常重要，而且需要根据具体通信问题的特点改进机器学习的相关算法。

## 6.4 应用与机遇

基于人工智能的开放物理层可以创造更多可能性。机器学习技术可以用于信道估计和数据检测，空白频谱感知，超密集组网中的小区聚类，HetNets中的异构基站聚类，未知条件下的能源和分布式资源分频，协同网络中心与本地之间的计算存储协调，也可以应用于移动用户的位置和行为预测，基于数据的用户行为分类，未知网络条件下的用户决策推断等。

Open5G的开放物理层在垂直工业可以发挥新的应用，比如在智慧医疗中用于生理参数射频智能感知与低功耗智能网络，在工业物联网中用于动态环境和场景感知的自动化智能组网。开放智能物理层有诸多技术应用场景，比如5G资源协同通信应用场景、数字广播电视的开放式存储应用场景、多体制波形融合应用场景等等。

### （1）5G资源协同通信应用场景：

通过开放通信带宽资源丰富的用户，如：与基站距离较近或与基站有直射路径的中继可以提高小区边缘甚至信号覆盖不到的用户提高传输速率。特别在5G场景中，工作频点的提高带来最直接的影响就是小区覆盖范围的减少，特别在一些楼宇密集地区，高频带的电磁波很难穿透建筑面，这为蜂窝小区的分布带来了严峻的挑战，如果采用大量的基站，一方面布网的费用直线上升，而且与基站连通的有线线缆的铺设也成为一个大难题。在这种场景下，支持开放的用户中继组网、D2D通信，可以有效的增强小区的覆盖能力，如下图所示。

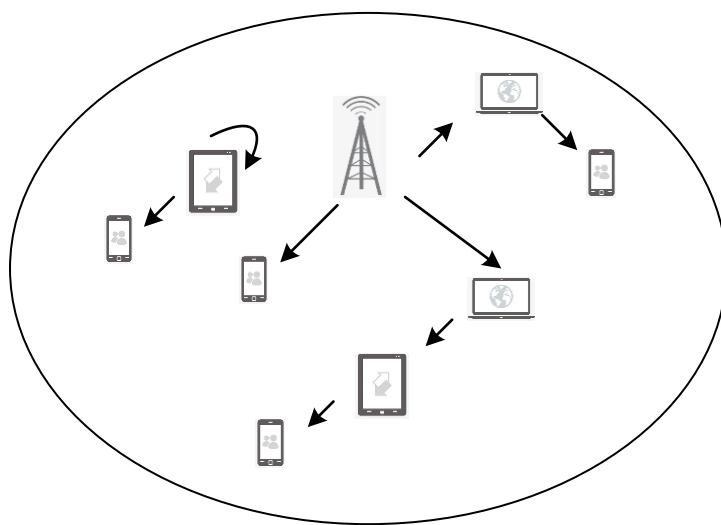


图 6.2 通信资源开放小区示意图

### （2）数字电视广播的开放式存储应用场景：

数字电视广播场景下，用户对无线网络所能提供的服务质量，如时延、错误率等的要求越来越高。另一方面，多媒体应用已经是现代移动网络承载的重要业务，这些业务占用了信息流量大，但内容集中，因此，将一些热点的多媒体内容存储在就近终端上，充分利用终端的存储资源，不但可以极大的减少用户对中心网络的流量需求，还有有效提高访问速度，从而提高网络的总体吞吐量，增强用户体验。

由于移动接入网的特点，组建的分布式存储网络具有网络拓扑变化大、通信链路带宽窄、



可靠性低的缺点，因此，开放式分布式存储要求能够容忍差错，比如一些终端的离开而导致的部分存储信息不可用，为了保持系统的可靠性，分布式节点信息必须能够被修复，从而产生新的存储节点，而节点的修复过程需要一定的通信量，网络编码以及D2D通信可以被用来提升修复的效率。开放物理层可应用于复杂无线网络中的优化开销修复、低编译码复杂度的修复码设计、考虑有差错场景的分布式存储系统等关键技术。

### （3）多体制波形融合应用场景：

在Open5G中，为了进一步架设开放式结构，兼容多种无线系统和海量可重定义的通信设备，以及适应频谱规划，满足通信质量等不同层次的需要，多种体制的系统和设备可能具有不同波形，这些波形在物理层空口叠加，会导致严重的系统干扰。针对这个问题，开放物理层可应用于多波形融合的开放式系统设计，一方面，多个通信体制的波形在空口灵活复用，包容并蓄；另一方面，在接收端引入先进的信号处理和编译码技术，实现波形的灵活分离。

面向Open5G的灵活波形设计：Open5G物理层的设计理念是不同场景信号灵活切换和接入，不同通信系统开放协作，资源共享。面向Open5G的开放式架构和多体制融合需求，开放物理层可应用于空、时、频多域联合的灵活波形设计。从信号的频域来看，可以结合GFDM、OFDM-OQAM等广义多载波技术，设计具有低带外特性的发射信号以兼容多个不同频段的波形，提升传输效率；从信号的时域来看，需要改善多载波信号的峰均比特性，抑制非线性失真引起的旁瓣影响；从信号的空域来看，可以利用大规模MIMO丰富的空域资源进行波性设计以抑制系统的干扰。需要建立多域联合信号优化算法，在空、时、频域维度同时对发射信号进行多维优化，适时调整多域联合优化参数，改变信号波形，自适应的满足新型多载波系统的动态需求，如下图所示。

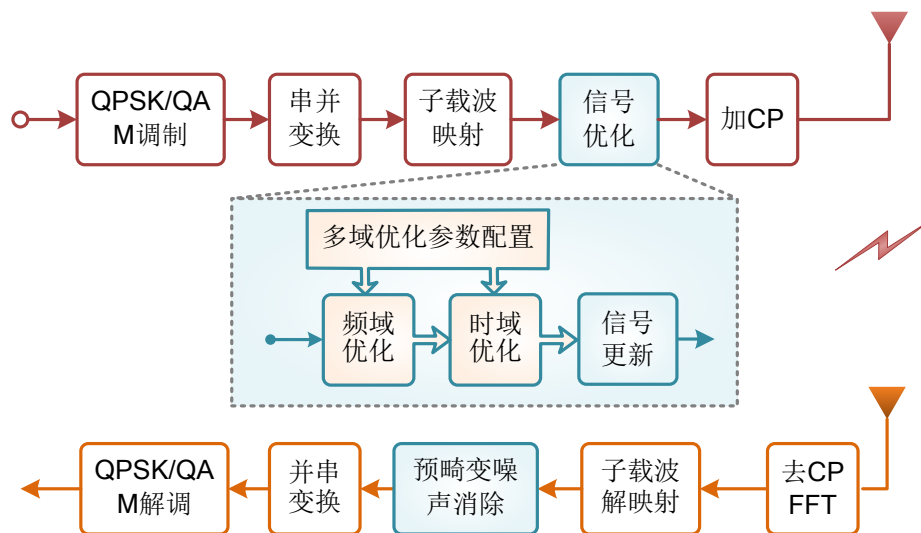


图 6.3 多域联合的新型信号优化示意图

面向Open5G的非正交波形设计：在Open5G的开放式框架中，同频段的波形信号可能会产生碰撞，从而导致严重的带内干扰和信号失真。针对上述问题，Open5G物理层也将考虑基于非正交的波性设计，在发射端不同系统的波形经过设计编码调制系统，在空口叠加，从而在接

收端结合新型信号检测和估计手段对非正交波形进行恢复。针对Open5G的开放式架构，需要设计接收端可分离的非正交波形以提升系统的开放性和灵活性。为了达到这一目的，从而在频谱效率、误码率和传输速率之间达到更好的平衡，就需要联合强有力的纠错编码和新型调制技术，重构具有可实现复杂度的发射端波形；在接收端，一方面，发展低复杂度近最大似然的译码和联合检测技术，另一方面，考虑信道估计误差、频率偏移、定时误差等非理想因素的影响，增强非正交波形的鲁棒性。

面向Open5G的全可编程波形与设计：全双工技术可以使频谱效率提高接近一倍，是有效利用无线资源的5G关键技术之一。全双工自干扰消除的重点是接收信号中的主径干扰，一方面可以利用Open5G开放智能物理层的智能分析和可编程SDR能力设计易于检测或消除的发射波形，另一方面可以利用其智能感知和机器学习的能力捕捉、检测和消除主径干扰信号。此外，由于多径信号受室内环境和人员影响发生变化，消除后剩余的多径干扰信号的扰动分析可以用于室内情景感知等技术。

## 7 开放硬件平台

### 7.1 FOSH 硬件平台

FOSH硬件平台类似开源软件一样，为硬件提供“开源源代码”，硬件组装零件单，硬件设计与组装方法，以及硬件运行方法。类似于在自由开源软件开发中所见，FOSH硬件平台加速创新。技术人员可以在彼此的工作基础上设计上分享和建造来开发FOSH硬件工具。由于硬件特殊性，涉及各个芯片、模组、驱动等多方面，并且需要行业广泛开放地合作。所以开源硬件发展相对滞后，不像自由开源软件那么容易拥有一个完整的开放平台。

目前在通信领域，典型的开放硬件平台是USRP/UHD。USRP是Ettus公司开发的软件硬件平台，其作用是使普通计算机用能像高带宽的无线电设备一样工作。USRP在硬件上拥有常见的软件定义无线电架构，集成通信模拟前端和高速ADC与DAC，且配备具有固有属性的FPGA。在软件部分，USRP驱动程序(UHD)支持在所有USRP SDR产品上开发应用程序。用户可以迅速移植代码，将重点放在算法设计，从而显著降低开发工作量。USRP/UHD还为多个行业标准开发环境和框架提供跨平台支持，包括RFNoC，GNU Radio，LabVIEW和Matlab/Simulink。

除了USRP外，还有BladeRF、HackRF、Sora等软件无线电平台。BladeRF与USRP非常类似，具有几乎一样的性能以及类似的硬件结构。HackRF则是一款极低成本软件无线电方案，从硬件到软件所有信息都采用开源授权。Sora是微软研究院软件无线电项目，其目标是完全使用软件处理最先进的无线通信技术。比较而言，Sora主要针对PC端，改善多核PC处理效率，增强数字信号处理速度，并使用PCIe接口提升PC与RF前端的接口带宽。目前微软Sora已经开源，已有WiFi，LTE，5G等多个项目在该平台进行研究。

在开放硬件平台支持下的应用不计其数，其中在通信领域，有一些典型的开源软件无线电项目，如OAI、srsLTE、OpenLTE、SoftWiFi等。OAI是一个持续更新的开源SDR LTE平台，

由法国的Eurecom组织发起、开发和维护。相比其他的开源SDR LTE平台，OAI在国际上拥有广泛的应用场景。OAI平台主要使用C语言编写，按照3GPP的标准实现了LTE的eNB，UE和EPC。支持FDD/TDD两种模式，也支持1.4、3、5、10、15和20MHz带宽；支持多种硬件设备，如USRP，BladeRF和EXMIMO等；该平台项目持续更新，已经支持Release 10；OAI平台内还包含了大量的仿真平台，用于对各种通信算法的验证，是目前开源SDR LTE平台里面最为完善的一个。此外，OAI现在已经开始着手5G软件无线电研究。

## 7.2 Open5G 开放硬件平台介绍

5G网络的应用场景可分为三类：提供更强带宽的增强移动宽带、提供大规模物联网机器间通信和提供高可靠低延时通信。为支持5G网络的开放设计，Open5G开源硬件需要适应多种应用场景的通信，高效支持通信及网络算法的开发和运行，总体可归纳为以下需求：

（1）通用的处理器架构。Open5G需要广大的开发者提供智力支持，采用通用的处理器架构，可以降低开发门槛，也便于移植已有的开源资源，提高开发效率；

（2）强大的处理器性能。通信基带算法及网络路由交换等都需要高效实时的计算能力，5G开放设计中的各种应用场景都需要强大的处理器性能提供支持；

（3）可调整的外围电路。Open5G支持多种接入模式，这要求硬件要具有灵活的外围电路调整能力，以便能适应接入模式的切换和升级换代；

（4）宽频高性能的可编程射频前端。5G通信覆盖多种应用场景，Open5G前端芯片和天线因此需要支持足够宽的频段，且满足相应的性能指标要求。为了满足可重配置的要求，前端芯片也需要具有可编程的特性，可以根据实际应用重新配置相应的收发模式；

（5）具有多种存储空间。如片上RAM、OCM，片外DDR、NAND FLASH等，满足多种类型数据读写和存储的需求；

（6）具有多种外设接口和扩展接口。如JTAG、以太网、GPIO、USB、串口、SD卡、SIM卡、PCIe、SPI、I2C等，以便上位机对其进行配置和数据交换以及进行接口扩展；

（7）稳定的电源电路。

由以上需求，开放硬件总体框架如下：

（1）一个通用、性能强的处理器核心，现阶段的ARM内核可以满足此需求；

（2）一块容量大、资源丰富的FPGA，可选择集成ARM内核和FPGA的SoC；

（3）具有可编程的射频收发模块，能满足常用无线通信协议的收发要求；

（4）具有丰富的存储器接口，能够满足不同数据的读写要求，且具有可扩展的外部存储器接口；

（5）具有丰富的外部通用外设接口；

（6）稳定的电源电路。

在Open5G开源硬件中，集成ARM、FPGA和片上存储介质的SoC作为硬件系统核心，外接射频芯片、存储介质和外设接口，由SoC负责基带数据处理及各接口数据转换与调度，射频模

块负责射频数据的收发及处理。

Open5G开源硬件的架构主要由处理器内核、FPGA、射频模块、存储介质（包含快速存储介质和大容量存储介质）和接口电路组成。为了提高集成度及其性能，可以选用集成处理器内核、FPGA和快速存储介质于一体的SoC芯片。核心组件(处理器内核、FPGA、射频芯片)均具有很强可编程特性，可以根据需求灵活配置相应的功能。

### 1) 总览

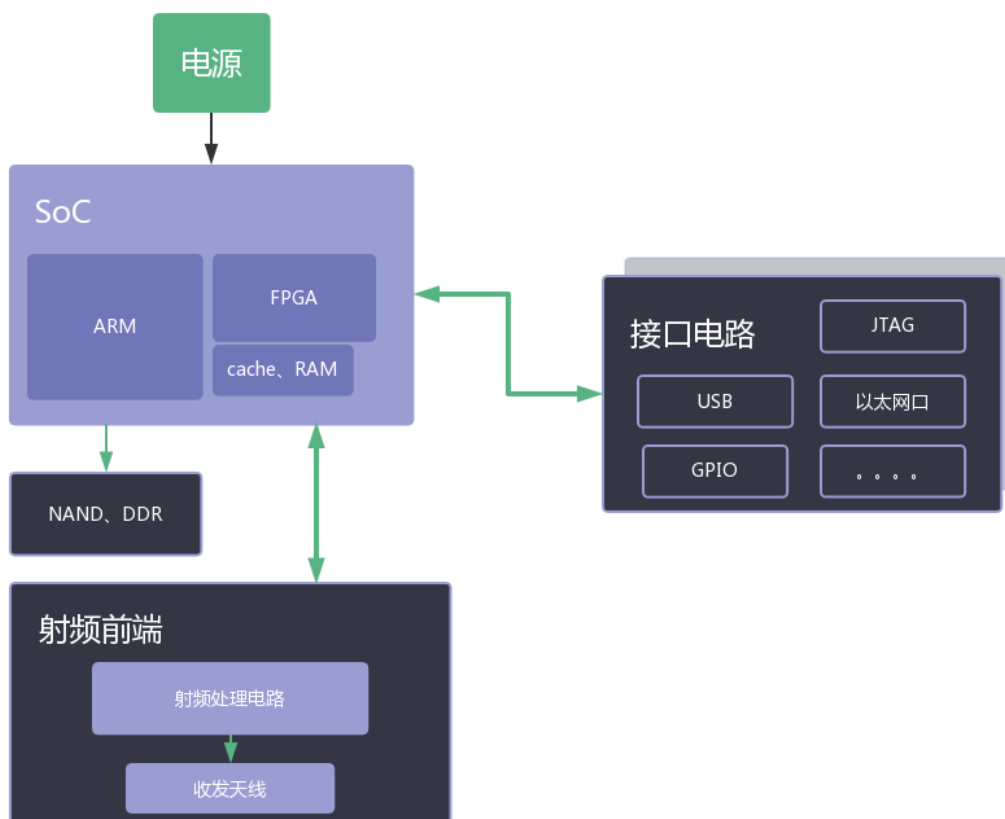


图 7.1 Open5G 开源硬件架构

Open5G开源硬件主要可以划分为三大核心部件，即核心处理器系统(包含存储介质)、射频前端模块、通用外设接口电路。如上图中所示，硬件系统以集成有ARM、FPGA和片上存储介质的SoC作为处理中心，外接射频前端模块、存储介质和接口电路，实现数据从基带到射频的处理以及不同外设接口之间的数据转换。

### 2) 结构功能分述

#### (1) SoC



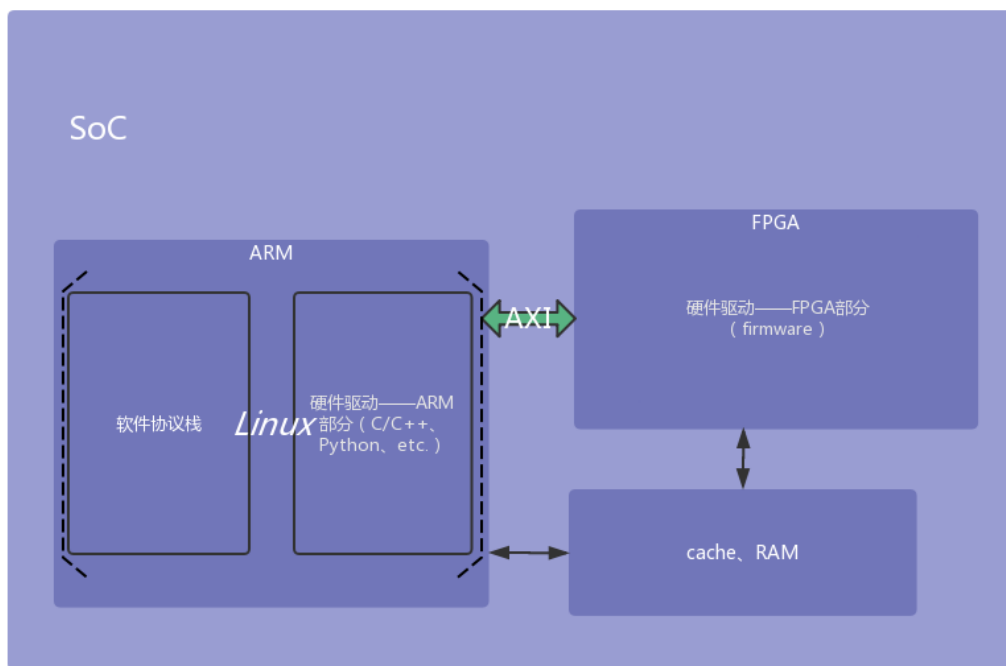


图 7.2 Open5G 开源硬件 SoC 功能描述

开源硬件中，SoC 由 ARM 内核、FPGA、存储介质构成。

- **ARM 功能：**运行 Linux 系统，并在 Linux 中运行实现具体算法的软件协议栈（如 OpenBTS）和硬件驱动（如射频前端驱动）。鉴于 ARM+Linux 的通用性，Open5G 开源硬件可以支持大量的开源软件协议栈和开源驱动在其上运行；
- **FPGA 功能：**通过烧写固件（firmware）的方式将 FPGA 配置成特定结构的电路，从而实现各种通信协议所需的数据实时处理功能。

## （2）射频前端

开源硬件中，射频前端为射频处理电路和收发天线构成。

- **射频处理电路：**射频处理电路用于将 SoC 处理后的基带数据变换成射频数据，再通过发射天线辐射到空间中；与此同时，接收天线接收空间中的无线信号，并将接收到的射频数据变换成基带数据给 SoC 进行处理，一般采用可编程高性能集成射频集成电路（IC）实现，以提高集成度和降低功耗。
- **收发天线：**采用支持多频段收发的高增益天线，能满足多种通信协议的需求，同时支持多组天线收发，支持 MIMO 系统的设计。

## 8 Open5G 开放示例

目前，开放的 5G 实验室、实验网、平台比较多，所提供的能力差别较大，涉及 Open API 与 Open Source。在介绍现有的一些 Open5G 的开放示例之前，本章需要首先澄清 Open API 与 Open Source 的定义与外延，并争取达成某些共识。

无论是Open API还是Open Source都是必要的。Open Source为改进或者改变网络能力本身提供了可能性。Open API则是为改变能力的使用方式提供了可能。与开放式架构的目标和应用场景相对应，能力提供者利用开放式架构进行技术创新，以研究更好的系统架构设计、使能技术以及运维优化能力，因此，需要能够对其所研究的“能力”本身进行改变，需要Open Source；解决方案提供者，通过在使用网络能力方面进行创新，提供更加满足需求服务，因此需要将网络能力与使用形式进行对应，需要Open API。

基于这样的理解，Open5G框架内的内容分为两个Classes。Class 1: Open API（或调用接口）；Class 2: Open API（或调用接口）+ Open Source。对于Open5G开放框架下的所有内容，都应该以开发应用或者开发能力为目的，提供Open API或调用接口，也即为Class 1。同时，也鼓励或者有针对性地，将一些能力定义为Class 2，以推动技术研究和创新。Class 1是强制的，Class 2是可选的。

## 8.1 OneNET

物联网发展目前面临的问题包括：大并发的终端接入、海量数据存储容量、多类别终端接入多个平台情形下的接入协议兼容性。针对这些问题，中国移动基于开放共赢的理念，面向公共服务自主研发开放云平台OneNET，为各种跨平台物联网应用、行业解决方案提供简便的海量连接、云端存储、消息分发和大数据分析等优质服务，从而降低物联网企业 and 个人的研发、运营和运维成本，使物联网企业和个人更加专注于应用，共建以OneNET为中心的物联网生态环境。OneNET平台提供设备全生命周期管理相关工具，帮助个人、企业快速实现大规模设备的云端管理；开放第三方API接口，推进个性化应用系统构建；提供定制化“和物”APP，加速个性化智能应用生成。OneNET在物联网中作为PaaS层，OneNET为SaaS层和IaaS层搭建连接桥梁，分别向上下游提供中间层核心能力。它具备七大功能：海量连接、数据分析、数据存储、在线监控、消息分发、事件告警和能力输出。

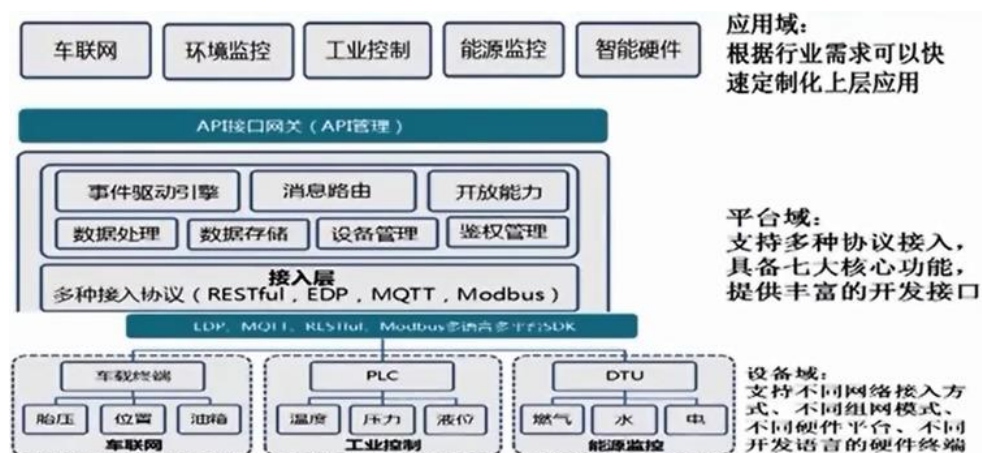


图 8.1 开放云平台 OneNET 的基本架构

## 8.2 5G SDR 平台

SDR软件无线电平台研究和建设，是中国电信技术创新中心面向未来技术的仿真与验证预研系统，旨在通过SDR的方式，更加高效真实地研究与评估各项针对5G以及未来通信系统的潜在技术的技术设计和系统性能，以及其对网络结构和性能的影响，从而更好的支撑标准化研究等相关工作。

SDR项目平台整体按照CPU+USRP架构，路径上既有依托于现有强大开源社区如OAI等开源代码下的演示验证，也有自主框架下的平台代码开发。由于平台的主要目的是聚焦物理层新技术的验证，因而协议栈等高层功能以及完全符合标准的物理层目前不是本项目关注的重点，高效率 and 易扩展的物理层平台是自主平台开发的主要方向。

基于该平台，我们的在研项目之一是LDPC码和Polar码的相关研究。目前，我们已经完成了一个QC-LDPC码的编译码器，基本架构与5G LDPC码的相同，在一些技术细节方面仍需要根据最后的标准进行调整。

我们已经完成了NOMA非正交多址技术的演示验证系统，通过实时过空口的方式，验证了有关NOMA的技术特点和性能增益，并在3rd OAI Workshop中进行了现场讲解与演示。

eLWA演示验证系统也是我们的在研项目，通过相关平台技术，旨在验证PDCP分流策略的相关算法，并对系统整体吞吐量，数据流分配的时延等相关问题进行技术研究和验证。

## 8.3 mM-IoT 智慧医疗物联网平台

mM-IoT物联网开放平台是面向智慧医疗的解决方案，应用于覆盖城市的居家养老、疗养小区等应用场景。小区居家养老场景是5G的一种典型智慧医疗场景，在家庭内有移动心电图机、血压计等健康监护设备，用于环境监测的多种传感器，和通信报警设备等无线设备，构成最基本的无线传感器网络单元。多个家庭、楼宇之间的数据可以通过无线自组网、移动通信网络或互联网上传到数据中心，如下图所示。

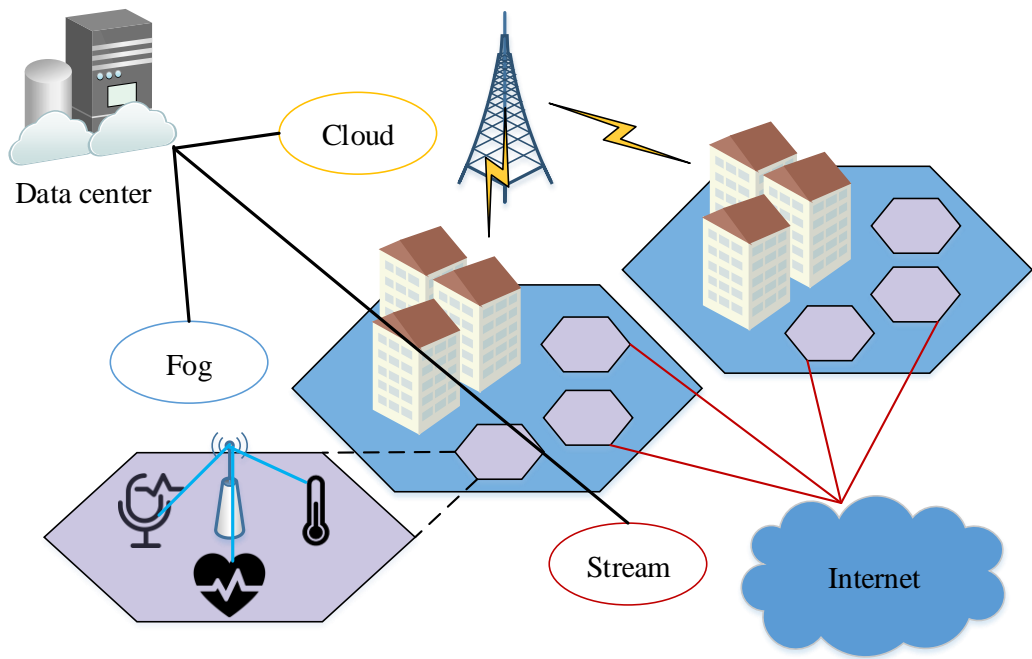


图 8.2 智慧养老逻辑场景图

mH-IoT通信网络主要分为三层结构，底层是室内mHealth监护设备和语音设备构成的家庭网络，中间层是一个社区内所有家庭节点组成的社区网络，上层是各个社区组成的城市网络。监护网络由三个域组成：空中域（Cloud）、地面域（Fog）和地下域（Stream），如下表所示。

表 8.1 mH-IoT 监护网络划分

| 域           | 场景        | 无线/有线 | 距离  | 通信技术            |
|-------------|-----------|-------|-----|-----------------|
| 空中域（Cloud）  | 社区网络、城市网络 | 无线    | 长距离 | eMTC、NB-IoT     |
| 地面域（Fog）    | 家庭网络、社区网络 | 无线    | 短距离 | WiFi、ZigBee、BLE |
| 地下域（Stream） | 社区网络、城市网络 | 有线    | 长距离 | 互联网（IPv6）       |

通信由mH-IoT网关实现，一方面支持语音报警数据和监护设备数据的收集，另一方面将数据选择合适的通信协议和链路将数据上传。网关的通信可以支持长距离的eMTC、NB-IoT，短距的ZigBee（IPv6）、WiFi、蓝牙，和有线的互联网，分别对应网络中三个域的通信。网关支持动态智能组网，可以判断自身所处的通信环境和通信位置，选择适合的通信技术并转换相应的物理层通信协议，以及其他物理层参数的转换。



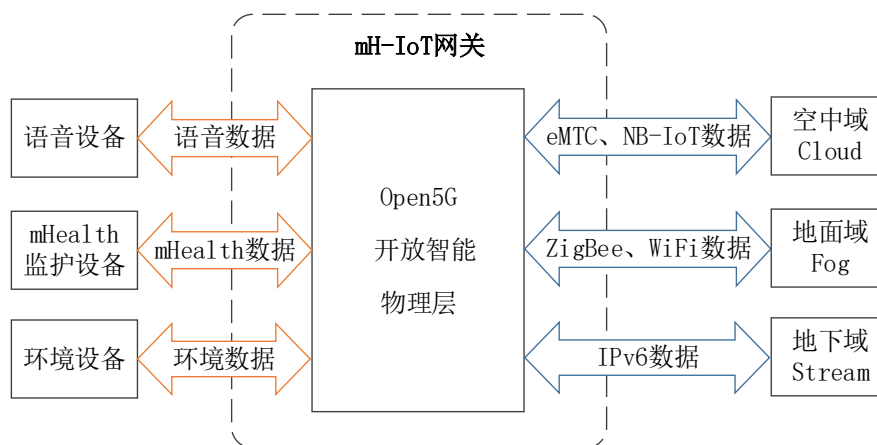


图 8.3 mH-IoT 网关示意图

mH-IoT平台的主要应用场景有：

(1) 日常健康安全监护：低功耗，小数据，大量连接；

电池续航能力对于无线健康监护设备很重要，通过网络能耗优化提高无线设备的能量效率。健康监护设备具有数据量小但是设备数量众多的特点，平台可以对应的进行接入的控制和频谱优化。

(2) 社区医院家庭病床：音视频通话，测量数据传送，网络医生巡诊交互，中等数据连接；

在社区医院或者家庭中，为病床提供语音视频通话的功能，方便病人出现紧急情况时进行求助。此外，通过病床测量病人的生理数据并上传，医生可以进行远程诊断。由于对数据及时性的要求，存在中等数据量的连接。

(3) 紧急报警救治服务：实时数据传送，移动数据传送，少量数据连接；

对于突发疾病，提供紧急报警救治服务，支持实时的数据上传和移动通信，相比于长期监护，这类服务数据链接量相对较少。

通过开放的智能物理层，可以支持以上场景的智能感知、自动优化和智能适配，从而实现功耗，体验质量（QoE）的统一优化。

## 8.4 TCL 5G SDR 平台

对SDR软件无线电平台研究和建设，是TCL通讯面向5G技术的算法验证、性能评估、功能演示的平台，通过SDR平台验证公司3GPP相关提案，同时该平台也作为5G终端预研和性能验证的平台。TCL通讯成功打造了Open5G终端平台，硬件上基于uTCA架构，软件上运行OAI，该平台可扩展性强、稳定性高、是基于开源软件搭建的软硬结合的5G通用开发、测试、应用平台。该平台不仅允许TCL通讯及其合作伙伴迅捷地验证各种潜在的5G技术方案，而且该开放式终端平台，能和基于OAI的eNB、EPC互联互通，同时也支持和商用eNB、EPC的互联。

OAI的LTE协议完全兼容R8以及绝大多数R10子集，基于OAI的开源软件基础上进行全面

优化，基带处理采用通用的处理器，基带和射频接口支持多种高速通信协议，如RapidIO, PCIE等协议。通用平台结合软件无线电的优势能在AMC板卡上运行OAI软件。图8.4是UED的平台，平台体积紧凑，功能强大，同时也集成高性能FPGA芯片，部分物理层功能可以平移到FPGA中完成，该平台不仅支持物理层和MAC，RLC等层在不同物理实体中运行，同时也支持物理层中的不同模块在GPP和FPGA之间无缝链接，以支持5G的高速率需求。



图 8.4 基于 OAI 的 5G UE 平台

## 8.5 超级基站平台介绍

为满足未来移动通信网络容量提升1000倍，能耗降低1000倍的目标，中科院计算所提出了全局、智能、虚拟化、以计算为核心的超级基站系统架构（如图8.5所示），通过射频、基带资源、协议处理资源和智能资源管控四层水平资源池化共享，全面颠覆当前基站物理叠加的组网模式。通过对时频、基带、计算资源进行动态组合形成逻辑小区，完成对目标区域的覆盖。同时，在水平资源共享的超级基站架构中，各资源采取多模的通用架构，只需要对相应的单元进行配置加载或升级定制，就能重用现有的基础设施，满足网络覆盖和升级发展的需求。

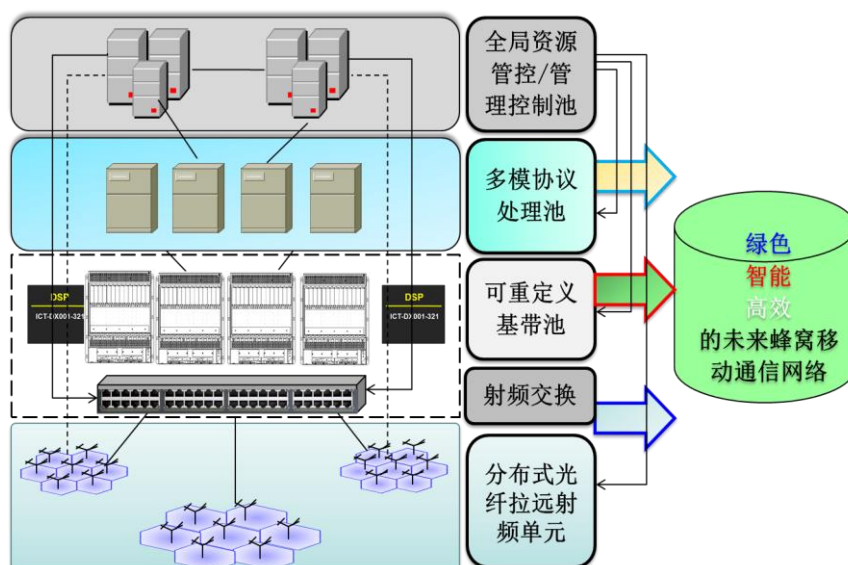


图 8.5 超级基站系统架构

在此架构下，中科院计算所成功研制了超级基站平台（实物图如图8.6所示）。超级基站平台采用CPU+FPGA的开放式可扩展架构和开放式软硬件接口，具有大规模资源虚拟化与动态复用、全局智能资源管控、通信节点协同计算等先进特点，支持超大容量通信、海量用户的集中式基带信号处理和协议处理，支持2G/3G/4G/5G/宽带无线接入/卫星等各种无线通信标准。同时，该平台支持虚拟基站/切片的生成、处理任务在不同板卡间的动态无缝迁移等功能。



图 8.6 超级基站平台实物图

## 8.6 Open5G 开源硬件实例

基于Open5G开源硬件的理念，这里介绍开源硬件平台R7 SDR。其核心模块SP100是一款

结构紧凑，性能强大的SDR模块。板卡70mm×70mm 大小，集成大容量FPGA，双核ARM® Cortex™ A9，支持2T2R射频收发，频率范围70-6000MHz，最大模拟带宽56MHz，模块采用Qseven结构和接口模式，设计紧凑，接口丰富，有效支持2G、3G、LTE等通信系统的实现。

### 1) SP100系统框图

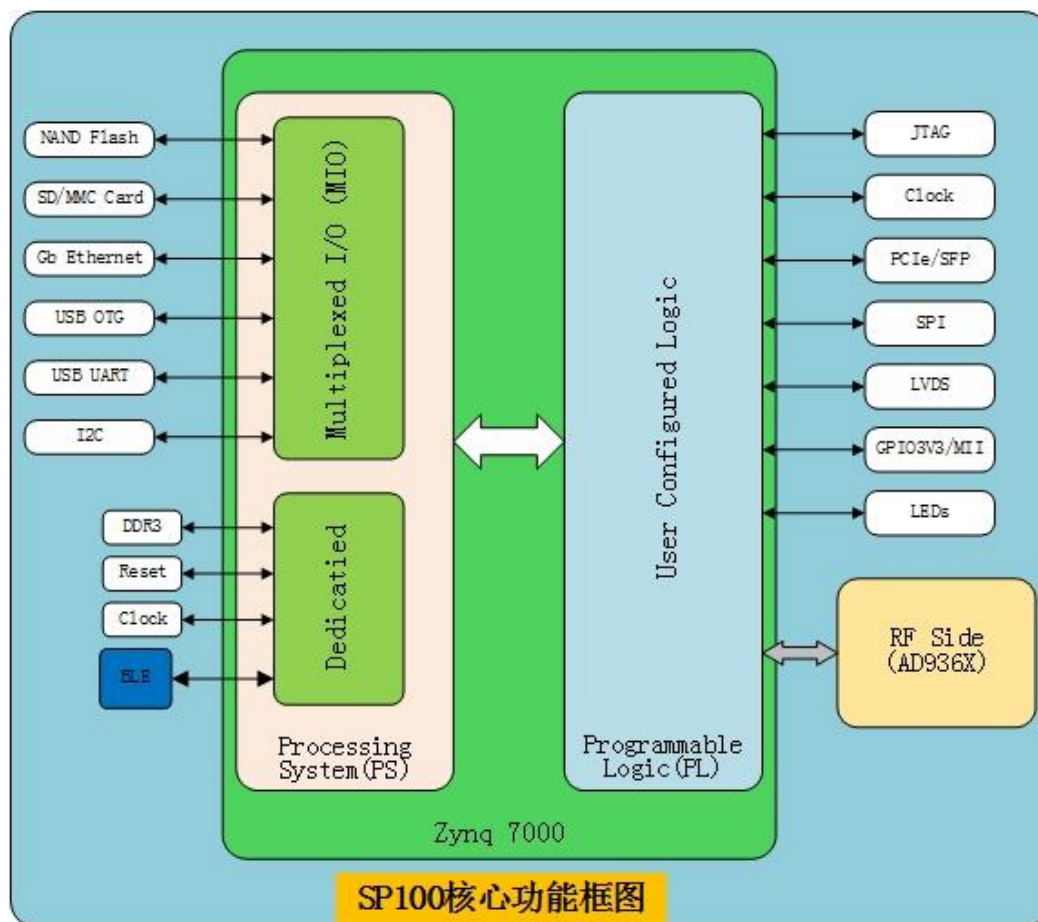


图 8.7 SP100 核心功能框图

在SP100中，以PS（即ARM处理器内核）为核心，辅以PL(即FPGA部分)作为特殊外设，外加AD9361射频芯片构建射频前端模块，同时配之以多种通用外设接口，能有效支持2G、3G、LTE等通信系统的开发与实现。具体技术规格如下：

- (1) 噪声系数: 3.5dB(MAX Gain @ 2.4Ghz)
- (2) nTX EVM:  $\leq 40\text{dB}$
- (3) TX Noise:  $\leq -157\text{dBm/Hz}$
- (4) 时钟精度:  $\pm 1\text{ppm}$
- (5) 相位噪声:  $-109\text{dBc/Hz}$  10Khz @ 1Ghz
- (6) IIP3:  $-14\text{dBm}$  (MAX Gain @ 2.4Ghz) , IIP2:  $45\text{dBm}$  (MAX Gain @ 2.4Ghz)
- (7) 最大接收增益 : 70dB
- (8) 工作温度:  $-30^{\circ}\sim 75^{\circ}$



(9) 供电方式: 5V±10%供电方式, ≤2A, 符合Qseven要求

(10) 结构和安装要求: 板子尺寸: 70 mm x70mm, Qseven安装方式

## 2) R7 SDR特点

R7 SDR是一款高度集成、高灵活性的可扩展SDR平台, 具有丰富的外设接口和扩展接口, 具有很强的扩展能力。主要具有如下特点:

(1) 兼容性强: 可兼容XC7Z030或者XC7Z045等多款Xilinx Zynq-7000系列SoC芯片;

(2) 支持2T2R射频收发, 工作频率70-6000MHz可选, 模拟带宽0.2-56MHz可变;

(3) 启动方式灵活: 同时支持 NAND FLASH、SD 卡、JTAG 启动方式, 可通过软件进行灵活设置;

(4) 支持多种时钟输入和外部时钟同步: 板载时钟±0.5ppm@25MHz; 外部单端时钟输入; 外部差分时钟输入; 支持同步信号输入和输出, 实现板卡级联触发同步;

(5) 支持低功耗蓝牙(BLE)协议栈开发;

(6) 具有丰富的外设接口: 具有PCIe/SFP 接口、UART 接口、千兆以太网接口、USB 接口、SDIO 接口、射频控制接口和JTAG 调试接口等, 支持SPI、GPIO3V3/MII、LVDS 等接口扩展。

## 9 总结

5G网络的三大应用场景突破了传统移动通信面向人与人通信的局限, 标志着5G必须解决人与物、物与物之间的通信。由于5G业务的差异性/多样性、技术与标准的碎片化, 传统网络的单一运行模式不在适用, 因此, 5G网络必须开放、开源, 具备灵活性和定制化的特性。本白皮书提供了FuTURE FORUM近期在开放5G网络及其关键技术等方面的相关成果和观点, 具体包括:

(1) 阐述开放5G网络的基本概念: 以运营商的视角, 分析5G网络演进的技术需求, 依据网络开放的程度, 从黑盒、白盒、灰盒网络三个层次分别阐述开放网络的基本内涵, 进而给出开放网络的总体目标和场景, 并探讨了关键使能技术SDN/NFV与Open5G的关系。

(2) 开放式核心网: 回顾传统核心网的变迁及现阶段的关注重点, 阐述3GPP SBA网络架构及其应用, 介绍完全基于免授权频谱的MultaFire基站与开放式核心网。

(3) 开放式无线接入网: 介绍ORAN网络, 提出CU平台的能力开放与软件开放、DU平台的接口开放以及白盒化的RRU/AAU。

(4) 开放式终端: 从设备能力和开放的角度两个层面定义开放式终端, 并提出一种开放式终端架构, 包含开放的软、硬件资源架构和独立抽象的开放配置管理层。

(5) 开放物理层: 分析了开放物理层的定义、需求、技术挑战和应用场景, 并提出了一种5G开放智能物理层架构, 通过开放接口来对端到端的网络切片提供底层服务。

(6) 开放硬件平台: 分析了Open5G开放硬件的需求, 并提出了Open5G开源硬件的总体框架。

(7) Open5G开放示例：在阐述Open API和Open Source的关系的基础之上，对现有的一些Open5G开放示例进行了简介。

5G网络开源、开放的软硬件生态才刚刚开始建立，目前尚存在着对于开放式5G网络不同的定义和解决方案。本白皮书旨在对Open5G网络的基本概念、可能的解决方案、技术挑战和应用进行梳理和分析，并提供了现有的一些开放示例作为参照，为日后建立完善的开源、开放生态提供指导。

FuTURE FORUM 将与全球合作伙伴共同努力，形成协同创新的生态环境（包括开源社区、开放实验室与软硬件环境），建成面向全球的开放创新平台，满足未来移动互联网、物联网和垂直行业需求。

## 缩略语对照表

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 3GPP  | 3rd Generation Partnership Project              | 第三代合作伙伴计划 |
| AAU   | Active Antenna Unit                             | 有源天线单元    |
| ADC   | Analog to Digital Converter                     | 模数转换器     |
| AI    | Artificial Intelligence                         | 人工智能      |
| API   | Application Programming Interface               | 应用程序编程接口  |
| BBU   | Building Base band Unit                         | 基带处理单元    |
| BIOS  | Basic Input Output System                       | 基本输入输出系统  |
| CDN   | Content Delivery Network                        | 内容分发网络    |
| CR    | Cognitive Radio                                 | 认识无线电     |
| C-RAN | Cloud RAN                                       | 无线云网络     |
| CU    | Centralization Unit                             | 集中单元      |
| CUDA  | CU Data Analytics                               | CU 侧大数据分析 |
| D2D   | Device-to-Device                                | 设备到设备     |
| DAC   | Digital to Analog Converter                     | 数模转换器     |
| DU    | Distribution Unit                               | 分布单元      |
| DUDA  | DU Data Analytics                               | DU 侧大数据分析 |
| eMBB  | Enhanced Mobile Broadband                       | 增强移动宽带    |
| ETSI  | European Telecommunications Standards Institute | 欧洲电信标准化协会 |
| FDD   | Frequency Division Duplexing                    | 频分双工      |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| FOSH         | Free Open Source Hardware                   | 无线开源硬件     |
| GFDM         | Generalized Frequency Division Multiplexing | 通用频分复用     |
| HetNets      | Heterogeneous Networks                      | 异构网络       |
| IaaS         | Infrastructure as a Service                 | 基础设施即服务    |
| IoT          | Internet of Things                          | 物联网        |
| ITU          | International Telecommunications Union      | 国际电信联盟     |
| KPIs         | Key Performance Indicators                  | 关键能力指标     |
| LTE          | Long Term Evolution                         | 长期演进       |
| MAC          | Media Access Control                        | 介质访问控制     |
| MANO         | Management and Orchestration                | NFV 管理与编排  |
| Massive MIMO | Massive Multiple Input Multiple Output      | 大规模多输入多输出  |
| MEC          | Mobile Edge Computing                       | 移动边缘计算     |
| mMTC         | Massive Machine Type Communications         | 海量机器类通信    |
| NFV          | Network Function Virtualization             | 网络功能虚拟化    |
| NFVI         | NFV Infrastructure                          | NFV 基础设施   |
| OFDM         | Orthogonal Frequency Division Multiplexing  | 正交频分复用     |
| ONAP         | Open Network Automation Platform            | 开放网络自动化平台  |
| OPNFV        | Open Platform for NFV                       | NFV 开放平台   |
| ORAN         | Open-RAN                                    | 开放式无线接入网   |
| OQAM         | Offset Quadrature Amplitude Modulation      | 偏移正交幅度调制   |
| PDCP         | Packet Data Convergence Protocol            | 分组数据汇聚协议   |
| QoE          | Quality of Experience                       | 体验质量       |
| QoS          | Quality of Service                          | 服务质量       |
| RaaS         | Radio Frequency as a Service                | 射频即服务      |
| RAN          | Radio Access Network                        | 无线接入网      |
| RDA          | RAN Data Analytics                          | RAN 侧大数据分析 |
| RRC          | Radio Resource Control                      | 无线资源控制     |
| RRU          | Remote Radio Unit                           | 射频拉远单元     |
| SaaS         | Software-as-a-Service                       | 软件即服务      |
| SBA          | Service-based Network Architecture          | 基于服务的网络架构  |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| SDAI  | Software Defined Air Interface            | 软件定义空口    |
| SDN   | Software Defined Network                  | 软件定义网络    |
| SDR   | Software Defined Radio                    | 软件定义无线电   |
| TCO   | Total Cost of Ownership                   | 总拥有成本     |
| TDD   | Time Division Duplexing                   | 时分双工      |
| URLLC | Ultra-Reliable Low Latency Communications | 超可靠低时延通信  |
| USRP  | Universal Software Radio Peripheral       | 通用软件无线电外设 |
| VNF   | Virtual network function                  | 虚拟网络功能    |

微信扫描以下二维码，免费加入【5G 俱乐部】，还赠送整套：5G 前沿、NB-IoT、4G+ (VoLTE) 资料。

