

# 开放 5G 网络架构与开源平台

## Open 5G Network Architecture and Open Source Platform

赵明/ZHAO Ming  
王京/WANG Jing  
田志刚/TIAN Zhigang

(清华大学, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

人 类社会的网络化和虚拟化浪潮已经形成, 这个进程的一个标志就是从 2010 年开始移动通信终端数量超过了地球人口数量, 而且有预测认为 2020 年全球将有 260 亿移动通信连接设备<sup>[1-3]</sup>。未来远超人口总数的连接设备, 这正是 5G 移动通信技术发展的背景。国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) WP5D 第 22 次会议上, 已经正式将 5G 命名为 IMT-2020, 并发布了 IMT-2020 愿景以及时间表<sup>[4-5]</sup>。ITU 列举了若干未来非常有潜力的业务, 包括 3D 视频、超高清 (UHD) 屏幕、云计算、虚拟现实等, 并将这些业务归纳进 3 个主要的应用场景: 增强型移动宽带 (eMBB)、大规模机器通信 (mMTC) 和高可靠低时延通信 (URLLC)。

面对丰富的业务场景需求, 一方面我们认为不可能有一张网同时满足所有需求, 另一方面移动通信网络作为整个国民经济的基础设施, 又必须是公共统一的。由此可以预期, 对 5G 移动通信系统的最大的需求将是其定制能力、演进能力和服务国民经

收稿时间: 2016-03-18

网络出版时间: 2016-05-05

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2014AA01A703); 港澳台科技合作专项 (2014DFT10320)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0006-06

**摘要:** 提出一种开放网络研究框架, 及其开放网络架构解决方案。认为 5G 的 3 种业务场景向 3 类关键技术指标的灵活映射需求, 决定了基于公共资源池的网络切片是必然之选, 网络架构的开放性是保障敏捷切片所必须的, 网络和技术指标的演进也决定了传统垂直封闭网络架构不可持续。在该开放研究框架中, 各层、各域均给出了相应的技术模块, 传统垂直封闭网络协议架构也分别进行了解耦和集中化重构。该方案尝试性地满足性能、效率和业务需求, 并与开源协作开发模式结合。

**关键词:** 开放架构; 软件定义网络 (SDN); 网络功能虚拟化 (NFV); 超密集组网 (UDN); 开源

**Abstract:** This paper proposes an open framework and corresponding open network architecture. The flexible mapping from three kinds of application scenarios to three groups of key performance indicators (KPIs) determines that it is necessary to construct specific network slice from a common resource pool. The openness of network architecture is the base to guarantee the agile slicing. In addition, the evolution of network and KPIs need also change the style of conventional vertical close architecture. The proposed open architecture provides corresponding modules in each layer and domain, and redesigns the conventional architecture with decoupling and centralization. This solution tries to meet the needs of cellular performance, network efficiencies and application requirement, and combines with the open source cooperation practices.

**Key words:** open architecture; soft defined network (SDN); network function virtualization (NFV); ultra dense network (UDN); open source

济各行各业的能力; 5G 移动通信技术, 尤其是网络架构, 也将与以往迥然不同。近年来, IT 行业的发展可以给我们一些指引, 即采用开放网络架构, 包括基础设施虚拟化、网络处理平台化和面向应用与业务的端到端网络切片构建。

文章中我们从技术角度分析 5G 采用开放网络架构的必然性, 并给出一种开放网络架构解决方案。

### 1 开放网络架构的技术必然性

与传统移动通信网络相比, 5G 网

络面对的需求是全面而多元的, 面临很多技术挑战, 下面我们将详细分析这些技术挑战所导致的开放网络架构的技术必然性。

#### 1.1 需求与指标的灵活映射以及网络切片

5G 以前用“车”模型 (VAN) 来表达移动通信系统 (包括 IMT-2000 和 IMT-Advanced) 的性能指标需求, 而此次 ITU 通过雷达图的方式全面体现了 5G (IMT-2020) 的技术指标需求。ITU 定义了 8 个技术指标需求维度, 包括峰值速率、用户体验速率、频

谱效率、移动性、时延、连接密度、网络能量效率和流量密度,并将 3 个应用场景与 8 个技术指标做了映射,如图 1 所示。对比以往的技术指标需求可以发现,IMT-2020 中明确提出了连接密度、网络能量效率和流量密度等指标<sup>[6-8]</sup>。

将 ITU 的 8 个技术指标分为 3 类:

(1) 蜂窝组网性能。峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性以及隐含的覆盖保障是评价蜂窝组网性能的关键指标,与人的(语音或数据)通信需求比较贴近。值得注意的是,空口频谱资源的利用效率、空口网络流程的有效性也属于蜂窝组网性能的考量因素。比如, eMBB 中即时通信(IM)类业务,甚至大部分 OTT 业务,都会有大量的状态探测短包传输,这对于随机接入和终端休眠机制有很大挑战,因为传统机制对这类消息的传输效率很低。又比如,进入 5G 时代后,由于 eMBB 业务流量的爆发式增长,导致空口蜂窝密度的增加,称为超密集组网(UDN),这需要大量小区间协作以改善覆盖性能和降低干扰,而传统机制对于小区间协作所需的用户面和控制面覆盖方面效率都很低。

(2) 网络成本与效率。网络能量效率以及可支撑连接密度用来考量网络的有效性,主要是为提供一定服

务所需的成本,或以一定网络基础设施来支撑相应服务的效率,包含网络的能量效率和控制管理效率等。在 UDN 组网中,我们除了关注蜂窝组网效率外,还需要特别关注这种组网形态对应的网络成本与效率。控制面(C)与用户面(U)的覆盖需求差异越来越大,以至于第 3 代合作伙伴项目(3GPP)在高级长期演进(LTE-A)中标准化了一种 C/U 覆盖分离的异构组网(HetNet)形态,超蜂窝网络架构也有大量相关研究。因应这种无线组网的变化,接入网也分别用宏蜂窝基站与微蜂窝小站来负责 C/U 面的覆盖。在业务和人流潮汐效应下,大量小站有时是空闲的,需要网络及时控制其关闭和打开,以提高网络的能量效率。

(3) 端到端业务体验质量(QoE)保障。时延和移动性是当前自动驾驶等 URLLC 类业务提出的特殊需求, mMTC 类业务的终端低功耗低成本、网络超强覆盖也属于其特殊的 QoE 需求。每个业务都有其业务模型,都有需要特别关注的指标和流程,最终体现为用户或行业能直观感受的独特 QoE。

3 种业务场景对这 3 类技术指标的需求程度不同,甚至是矛盾的:

(1) 一般 eMBB 类业务。这类业务对蜂窝组网性能、网络成本与效率

这两类技术指标有较强需求,由于蜂窝移动通信系统的性能指标是按照人类的通信需求设计的,所以一般来说并无特殊的 QoE 需要保障。

(2) 一般 mMTC 和 URLLC 类业务。这类业务对网络成本与效率、业务 QoE 保障这两类技术指标有较强需求。对于 mMTC,网络防拥塞的需求属于网络成本与效率类技术指标,超强覆盖以及设计特别机制保障终端超低成本、低功耗属于业务特殊 QoE 保障需求。对于 URLLC,低时延属于特殊 QoE 保障需求,为此需要网络架构在很多节点提供业务卸载机制,以降低网络处理带来的时延,避免大量业务横穿网络影响其效率。

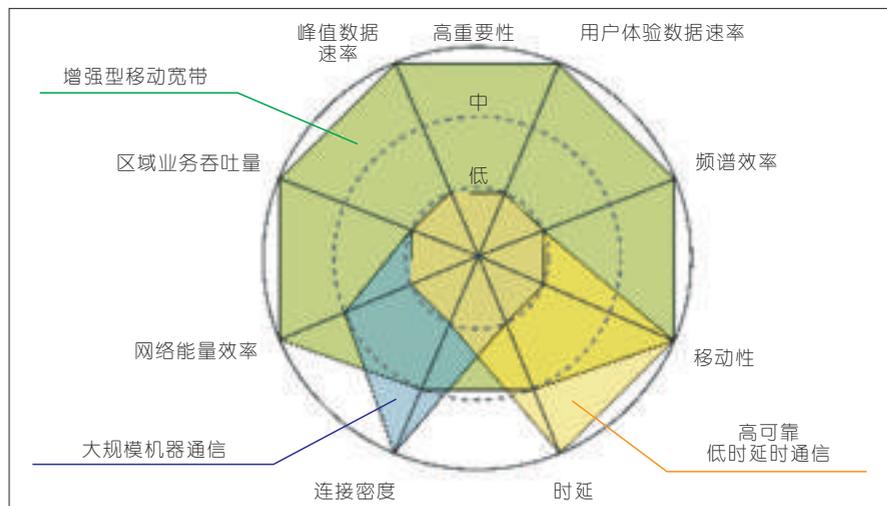
(3) 虚拟现实(VR) & 现实增强(AR)、无人机、机器人等业务。这类业务兼具 eMBB 与 URLLC 的部分特点,对性能与 QoE 保障这两类指标有较强需求,但对网络成本与效率的影响则并不突出。

基于以上讨论可以看出,不同的业务场景不可能同时要求满足 3 类技术指标。为支撑这种灵活映射,避免不同业务场景之间矛盾的技术指标需求,一种解决办法是:基于公共资源池,为不同业务与场景构建不同网络切片。切片之间有较好的隔离性,并可以很容易提供、迁移和编排管理。本质上这种切片化构建方法需要一种开放网络架构,可以敏捷重构,弹性扩展,并可持续演进<sup>[9-12]</sup>。

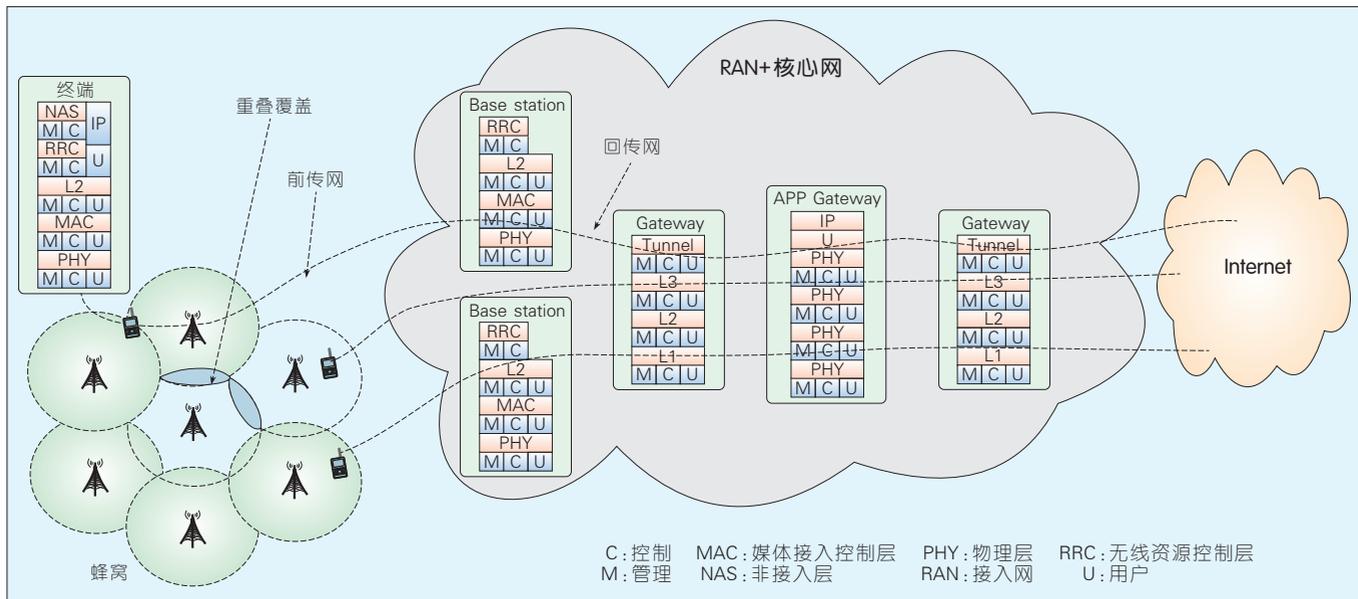
## 1.2 移动通信网络架构面临的技术挑战

从 2G 到 4G 的网络架构和流程基本是稳定的,我们将其概括为“蜂窝模型”和“管道模型”<sup>[13]</sup>。

(1) 蜂窝模型在空口通过小区为单位对空口资源进行划分和管理。在 5G 以前,小区之间重叠覆盖区域(如图 2 中的阴影部分)可通过网络优化而尽量减少,小区间协作较少,基站协议栈主要考虑空口承载的管理,彼此较为独立,具有“垂直封闭”



▲ 图 1 IMT-2020 网络关键技术指标



▲图2 蜂窝模型与管道模型

的特点。

(2)管道模型基本遵从开放系统互联(OSI)的7层协议参考模型,及经过宽带综合业务数字网(B-ISDN)/异步传输模式(ATM)充实后的管理(M)/C/U面模型。移动通信网络分为接入网和核心网,由一些具有独特功能的网元为主体,由点到点链路最终构成端到端连接,为终端与Internet提供具有移动性的业务连接,这些网元的协议栈较为独立,具有垂直封闭的特点。

蜂窝模型的特点如下:

- 地理上,通过基站对覆盖进行划分,并以小区为单位对频谱资源进行复用;
- 小区内,主要以双工和多址等正交方式对空口资源(时间、频率、空间和功率)进行划分;
- 小区间,以功控和切换来管理干扰;
- 移动性和承载上,通过接入、切换、漫游和寻呼等手段保障连接在小区间的移动性,承载基本由一个小区负责,并随着切换在小区间传递。

管道模型的特点如下:

- 接入网的基站和核心网的网关,都是具有独立功能的网元,维护

某段点到点承载,进而形成端到端连接,相互之间的依赖比较少;

- 每个网元的协议栈中不同协议层各有分工,自下而上提供服务,逐级封装;
- 向业务提供若干种质量等级的传输通道,以同一种网络制式服务较长时间内的业务。

面对5G的新需求,传统稳定的蜂窝模型和管道模型都将面临挑战。从蜂窝模型来看,UDN场景下,C/U面覆盖特性并不相同,C面需要高可靠,U面需要高性能,此时C/U面覆盖解耦对于各自的频谱效率来说都是最合适的。在mMTC海量连接场景下,小区内空口资源正交式管理也变得效率低下,至少需要在随机接入和多址机制设计上打破以往封闭的连接管理模式。

从管道模型方面来说,上述新的无线组网形态需要打破以基站为基本单元对空口资源进行管理,和以功能划分网元的接入网架构,使得追求效率的用户面以及追求灵活性和可定制化的控制/管理面解耦;解耦后的相应处理可与不同类型基础设施匹配,可由不同技术特征的平台加以支持,也可支持为不同的上层业务与

运营逻辑构建单独的切片。此外,垂直封闭网元和协议栈不利于基于卸载的边缘计算等业务部署模式,其逐段承载管理方式对于mMTC存在效率低下的问题,自底向上逐层封装无法满足按照业务QoE灵活重构网络的需求,所以需要打破垂直封闭网元的界限,将需要提高效率的环节解耦出来集中处理<sup>[4]</sup>。

所以说,即使只从3类技术指标中任意单项的满足方面考虑,传统蜂窝模型与管道模型也必须改变垂直封闭的特征,变迁到开放网络架构。

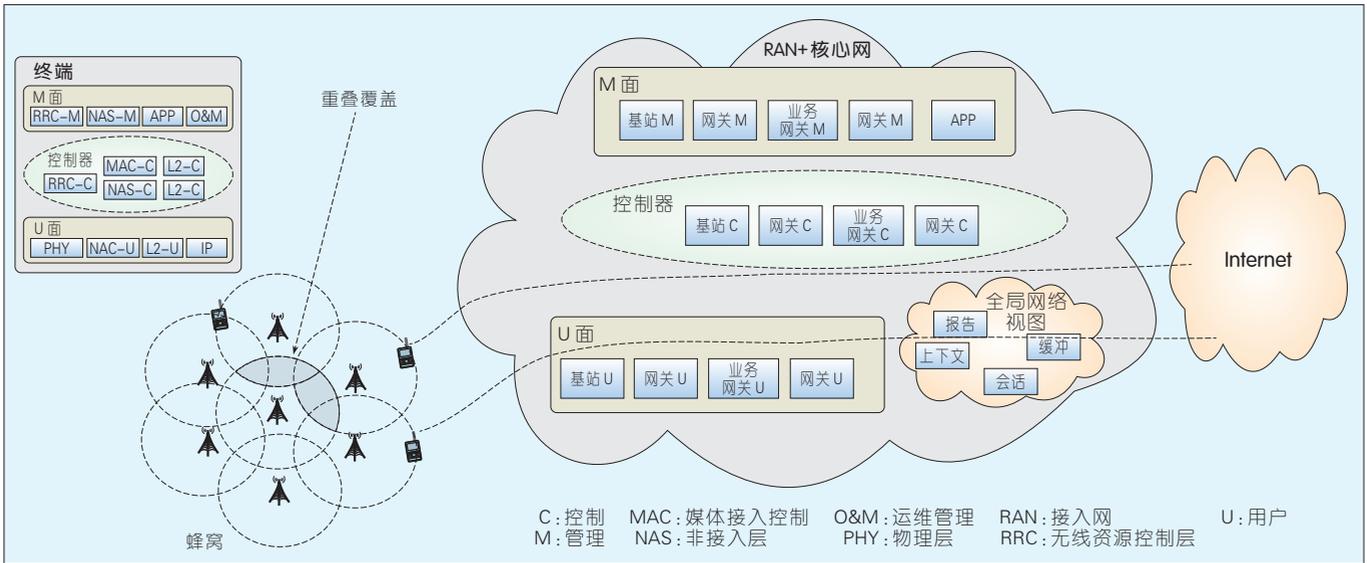
### 1.3 开放网络架构特点

针对上述两部分对于开放网络架构技术必然性的分析,我们给出一种解决方案,比较形化的描述为:将图2中蜂窝模型以及管道模型中的垂直封闭网元“放倒”,形成如图3所示的架构。

所谓“放倒”的学术化描述为:

(1)改变自底向上逐级封装的管道模型,将U面的协议层平坦化,既可灵活重构,又方便与上层业务的紧密结合;

(2)将垂直封闭网元的C面处理,以“虚拟化”的方式形成逻辑集中



▲ 图3 将垂直封闭网元与协议“放倒”的网络架构

的控制器,解决其不容易协调而效率底下的问题;

(3)将垂直封闭网元的M面开放,通过控制器的北向接口营造开放的管理与业务面,解决“公共基础设施与定制业务需求”之间的矛盾;

(4)将网络协议栈的“数据部分”(D),以分布式实时数据库的方式集中为全局网络视图(GNV),使得控制器处理几乎与状态无关,方便定制和重构,增强网元之间沟通效率。

上述思路,可以解决5G的性能、成本与效率以及QoE保障这3种需求之间的矛盾,满足无线网络架构的演进需求。

## 2 一种开放5G网络架构

针对传统蜂窝模型以及管道模型,以放倒的方式对U、C、M与D加以解耦或虚拟化集中,这种解决方案称为非栈式网络架构NoStack。这种架构是整个5G开放网络架构的核心部分,但还需要一个全面框架。

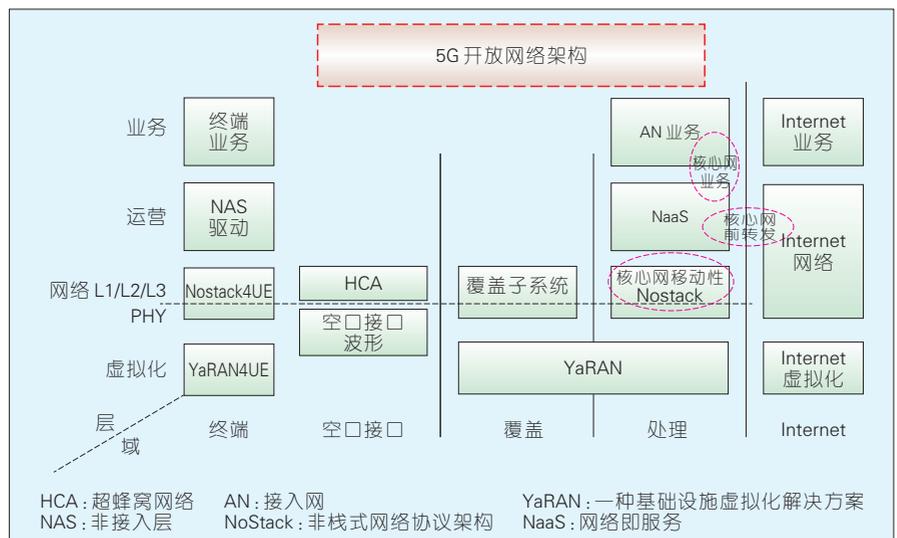
### 2.1 开放5G网络研究框架

我们首先给出包含多层多域的5G开放网络框架,如图4所示。纵向分为4个域:终端域、空口域、覆盖域和处理域;横向分为3层:基础设施

虚拟化层、网络层、运营/业务层,每个层与域的交叉点,都存在一个研究模块。

将覆盖域从接入域分出来是因为未来5G的天线与基带处理单元(BBU)不再一一对应,即前传网不再是简单的一对一连接,而是存在复杂的组网映射关系。设立基础设施虚拟化层,是因为未来的5G网络基础设施需要尽可能利用商用现成设备(COTS),比如通用服务器和交换机等,所以也需要虚拟化层屏蔽基础设施的具体细节。

开放网络架构中的网络协议层主要有3个模块:NoStack、覆盖子系统和超蜂窝网络(HCA)。其中HCA是对此前所说蜂窝模型的突破,而NoStack与覆盖子系统则是对传统管道模型的颠覆。HCA与NoStack/覆盖子系统是镜像关系,HCA所描述的新无线组网蜂窝模型有赖于NoStack+覆盖子系统在接入网去实现。在上述框架中,还包括基础设施虚拟化模块YaRAN、终端域的虚拟化架构YaRAN4UE以及网络协议架构NoStack4UE。YaRAN是一种适用于



▲ 图4 开放5G网络研究框架

5G的网络功能虚拟化(NFV)解决方案,其使命是为5G开放网络协议架构营造合适的运行时环境,包括高效的业务面处理环境,灵活可重构的控制面状态机环境,以及向业务开放和可敏捷定制的管理和业务面环境。按照NFV的理念,开放网络协议架构例化的虚拟网络功能(VNF)模块,需要被YaRAN所调度并投射在适当的基础设施资源上。终端侧的YaRAN4UE和NoStack4UE是接入网侧YaRAN以及NoStack+覆盖子系统的对偶模块。网络即服务(NaaS)模块主要是针对业务与行业的定制化服务,并且依赖于开放网络协议架构的支持。

2.2 一种开放5G网络架构解决方案

基于开放网络研究框架,我们给出一种5G开放网络协议架构的较详细设计,如图5所示。开放网络协议架构层,包括前述的放倒接入网架构NoStack、覆盖子系统和HCA。

HCA的特点如下:

(1)打破独立封闭小区的垂直封

闭协议栈,构建多天线协作控制架构,以此来实现跨小区的空口资源管理;形成横跨多个小区的鲁棒控制覆盖,对所覆盖区域内的空口资源进行统一管理。

(2)区别与以往的小区内靠双工和多址、小区间靠频率复用、功控和切换的模式,小区业务覆盖淡化传统以时间和频率为主的正交多址模式,主要是采用空间复用类非正交多址模式。

(3)蜂窝模型的工作流程发生较大变化,不再是终端主动与某个基站进行同步,接收广播信息,然后进行随机接入,而是由网络采用新型检测算法,从空口多天线信号中感知终端的存在及其定时,如图5中的用户感知覆盖。这样做的好处是:对mMTC类业务的海量连接和高连接密度,可以提高管理效率。

(4)3种覆盖相解耦,通过不同的组合,可以为不同业务场景需求有针对性的定制其空口制式。

覆盖子系统的作用有两重的:

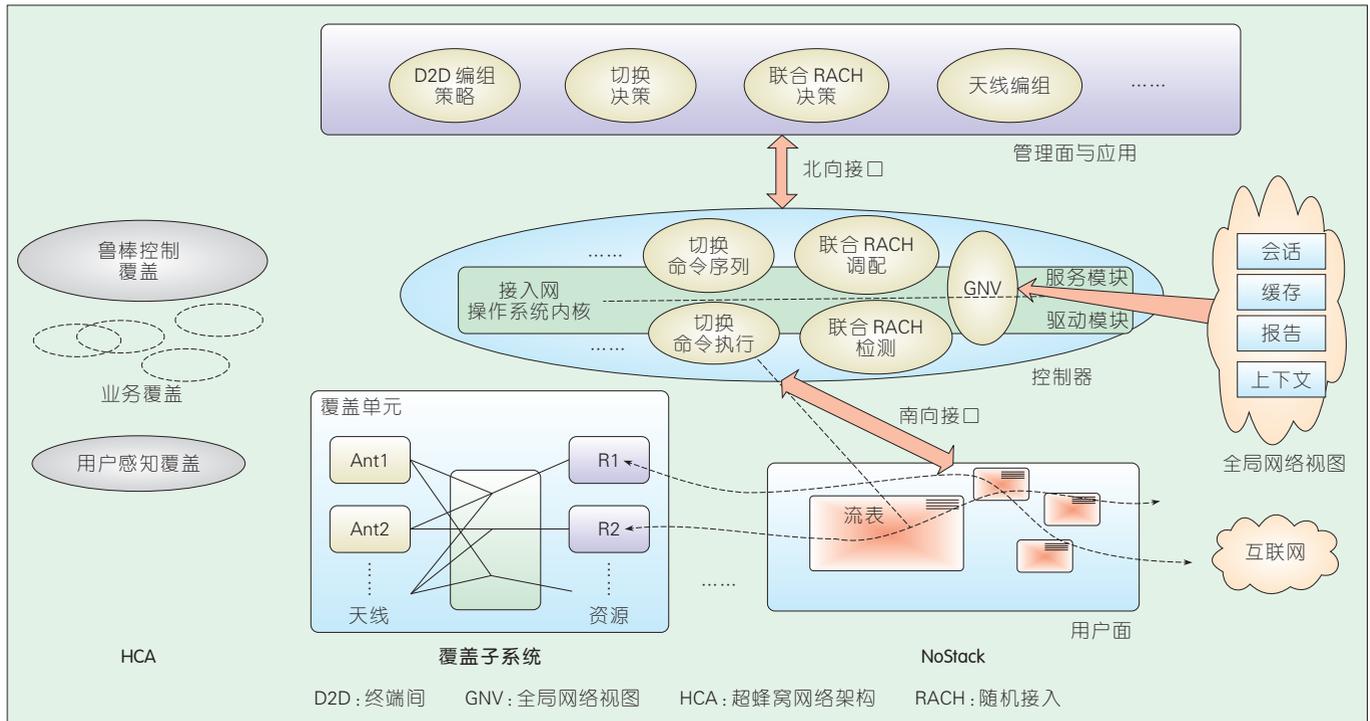
(1)一端以天线为提供覆盖服务

的主体,并不从属于某个小区,将小区级业务/控制流和用户级业务流向空口资源映射,包括时间和频率的划分,空间的预编码和功率的分配。覆盖子系统主要关注用户面,其控制放在NoStack的控制器中进行,上述划分、分配和配置都由控制器主导,天线只需要被动接受。

(2)另一端以小区控制流或用户业务流为输入,满足其对空口资源的请求,业务流之间也不需要协调,业务流在天线上只是线性叠加;当天线覆盖能力不足时,比如功率受限,由控制器确定分配方式。

通过上述设计,天线与小区控制流和用户业务流是解耦的,没有任何两个流的覆盖必须采用相同的天线集,满足HCA的灵活天线协作、面向用户的覆盖形成和空口无线组网体制可定制等需求,满足NoStack的以业务流为单位的处理体系,提高对海量连接的承载管理效率等。

对于NoStack来说,主要需要突破传统的管道模型的垂直封闭网络协议架构:



▲图5 以NoStack为核心的5G开放网络协议架构

(1) 淡化用户面协议层之间的耦合关系,制造“平坦化”的灵活处理的模式。

(2) 将 C 面处理从 U 面解耦出来,提高 U 面的处理效率。

(3) 解耦出来的 C 面,以逻辑集中的方式设计为控制器,减少传统架构中独立网元间复杂的信令流程,提高管理效率。

(4) 将 U 面的缓存、C 面的会话、向 M 面的报告,以及相应的半静态上下文,解耦出来存放在全局网络视图中,并且降低 C 面的状态相关处理,提高其可重构能力,以及向业务的开放程度。

(5) 控制器通过北向接口向 M 面提供高级控制服务,既提供面向业务的定制能力,又可以屏蔽底层处理的细节。

在开放网络研究框架中,开放网络架构的核心问题就是开放网络协议模型,我们分别对 3 个模块进行了阐述,探讨了这种设计在性能、效率和定制化方面的优势。

### 3 开放网络运营与开源协作研发

电信行业采用开放网络架构有其行业生态与运营经济发展的必然性,主要是移动互联网行业的 OTT 服务提供商的异军突起,以及由此带给电信行业的收入增速日益平坦与业务成本快速增加之间的剪刀差效应:行业源头的运营商遭遇了互联网行业的价值碾压,其提供的服务无法获得满意的利润分配,随之转移给行业下游的收入就更少。虽然收入增长不快,迫于 Wi-Fi 等替代连接方案的竞争,行业却必须承担 OTT 类业务大幅增长带来的成本压力,行业长时间积累的供给能力也在经历痛苦的消化。在这种状况下,有必要尝试开放与开源的组织模式,打破传统的价值分配模型,向其他行业渗透开放以挖掘价值,行业内部通过开源协作减少竞争成本。

移动通信行业正在经历广泛的分化整合,与上下游行业的关系也发生了深刻变化。行业生态中属于基础设施的部分,日益整合集中;与上下游重合的部分,正日益脱离并渗入各行各业。近年来影响巨大的 NFV 也属于这种趋势,基础设施必须进一步标准化和公共化,从而有利于上层业务的开发,这就必须“开放”和“开源”。开放是基础设施的必备属性,否则无以快速构建上层生态;开源是行业博弈导致的一种减少无效竞争的快速整合手段,通过开源协作形成周边生态是这种先进竞争手段的特征。在变革期,原先的科研、标准化和产品研发次序已经不明显,可以先从科研开始,为标准化和商用产品研发探索一条开放和开源的新道路。

### 4 结束语

文章中,我们尝试从技术层面推导开放网络架构的必要性,给出一种研究框架及开放网络架构解决方案,并初步探讨了开源协作研发模式对于电信行业所能提供的益处;但对于开放网络架构的探讨还需要细致的学理性分析,对于开源协作研发模式也需要在实践中进一步摸索。

#### 参考文献

- [1] Ericsson. Ericsson Mobility Report 2015—On the Pulse of the Networked Society [R]. Sweden: Ericsson AB, 2013
- [2] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020 [R]. USA: Cisco Systems Inc., 2016
- [3] Ericsson Networked Society Lab. ICT & the Future of Transport, Part 2/8 Industry Transformation – Horizon Scan[R]. Sweden: Ericsson AB, 2014
- [4] ITU-R. Report M.2370-0 (2015), IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030 [R]. USA: ITU-R, 2015
- [5] ITU-R. Report M.2083-0 (2015), Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. USA: ITU-R, 2015
- [6] 牛志升,周盛,周世东,等.能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战 [M].北京:中国科学,2012
- [7] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO A, et al. Coordinated Multipoint Transmission/Reception Techniques for LTE-Advanced [Coordinated and Distributed MIMO][J]. IEEE Wireless Communications Journal, 2010, 17(3): 26–34

- [8] 王京,姚彦,赵明,等.分布式无线通信系统的概念平台[J].电子学报,2002,30(7):937–940
- [9] China Mobile Research Institute. C-RAN the Road Towards Green RAN[R]. China: China Mobile Research Institute, 2011
- [10] 3GPP. Network Architecture: TS 23.002 [S].2011
- [11] The 1000x Challenge, More Small Cells – Taking Hetnets to the Next Level [EB/OL]. [2016-04-20].http://www.qualcomm.com/media/documents/wireless-networks-1000x-more-small-cells
- [12] HOYDIS J, K. HOSSEINI S, BRINK T, et al. Making Smart Use of Excess Antennas: Massive MIMO, Small Cells, and TDD [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(2): 5–21
- [13] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems with Linear Precoding and Downlink Pilots[C]//Proceeding of Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. USA, IEEE: 292–298, 2013. DOI: 10.1109/Allerton.2013.6736537
- [14] Mobile Broadband—Busting the Myth of the Scissor Effect [EB/OL]. [2016-04-22]. http://www.ericsson.com/news/100622\_ebr\_strategy\_mobile\_broadband\_244218601\_c

#### 作者简介



**赵明**,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心副主任、研究员;主要研究方向为无线与移动通信、软件无线电技术、宽带无线传输技术等;曾承担多项“863”项目;负责的中国第三代移动通信系统研究开发,获国家科学技术进步二等奖,并获得“863”十五周年先进个人称号;发表论文 70 余篇,申请专利 20 项。



**王京**,清华大学信息科学与技术国家实验室副主任,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心主任,微波与数字通信国家重点实验室副主任兼无线传输与个人通信研究室主任等;主要研究方向为无线移动通信、宽带无线传输技术等;曾承担多项“863”项目、科技攻关项目以及国防预研和型号等项目;负责的中国第三代移动通信系统研究开发项目获 2003 年国家科学技术进步二等奖,另获国防科学技术奖二等奖 1 项;发表论文 100 余篇,申请专利 30 余项。



**田志刚**,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心助理研究员;主要研究方向为 5G 网络研究,包括移动通信物理层和 MAC 层算法、软件无线电、网络协议与架构等。