



# 写给互联网工程师的 5G 书

## 5G Mobile Networks: A Systems Approach

Larry Peterson, Oguz Sunay

翻译：俞凡

英文版地址: <https://5g.systemsapproach.org/index.html>

中文版地址: <https://github.com/yuff100/5GSystemApproachCHN>

# 目录

目录 .....	2
前言 .....	4
致谢 .....	5
1. 简介 .....	6
1.1. 标准全景图 (Standardization Landscape) .....	8
1.2. 接入网 (Access Networks) .....	9
1.3. 边缘云 (Edge Cloud) .....	9
2. 无线传输 (Radio Transmission) .....	13
2.1. 编码与调制 (Coding and Modulation) .....	13
2.2. 调度器 .....	15
4G 中的多路复用 .....	16
5G 中的多路复用 .....	18
2.3. New Radio (NR) .....	20
3. 基础架构 (Basic Architecture) .....	22
3.1. 主要组件 .....	22
3.2. 无线接入网 (Radio Access Network) .....	25
3.3. 移动核心网 (Mobile Core) .....	28
4G 移动核心网 .....	29
5G 移动核心网 .....	30
3.4. 安全性与移动性 (Security and Mobility) .....	32
3.5. 部署选项 (Deployment Options) .....	34
4. RAN 详解 (RAN Internals) .....	37
4.1. 报文处理流水线 (Packet Processing Pipeline) .....	37
4.2. 分布式 RAN (Split RAN) .....	38
4.3. 软件定义 RAN (Software-Defined RAN) .....	40

4.4. 架构演进 (Architect to Evolve) .....	42
5. 高级功能 (Advanced Capabilities) .....	46
5.1. 数据面优化 (Optimized Data Plane) .....	46
5.2. 多云部署 (Multi-Cloud) .....	49
5.3. 网络切片 (Network Slicing) .....	50
<i>RAN 切片 (RAN Slicing)</i> .....	51
<i>核心网切片 (Core Slicing)</i> .....	55
6. 参考实现 (Exemplar Implementation) .....	57
6.1. 框架 (Framework) .....	57
6.2. 平台组件 (Platform Components) .....	60
7. 云化接入网 (Cloudification of Access) .....	63
7.1. 多云部署 (Multi-Cloud) .....	63
7.2. 边缘云即服务 (EdgeCloud-as-a-Service) .....	64
7.3. 研究方向 (Research Opportunities) .....	66
关于本书 .....	68
阅读本书 .....	68
构建本书 .....	68
为本书做出贡献.....	69
关于作者 .....	69
关于译者 .....	70

# 前言

全球通信基础设施向 5G 的演进正在进行中，除非你一直试图主动忽略它，否则你肯定会听到很多这方面的声音。但是，如果你和世界上 99% 受过计算机科学训练、以系统为导向、精通云计算的人一样，那么对你来说，移动蜂窝网络在很大程度上还是个谜。你知道这是一项重要的技术，用于将人们连接到互联网，但实际上它已经在你的关注范围之外了。也许你还听说过一两个关于 5G 将如何导致一些可怕的副作用的阴谋论——这表明围绕 5G 的炒作可能没有取得预期的效果。

关于 5G，需要了解的重要一点是，它不仅仅意味着更大的带宽（尽管这点也很重要）。更重要的是它关系到接入网的变革，这使得它更像现代的云。另外，一些重要的技术趋势，如软件定义网络（SDN, Software-Defined Networking）和开源软件，将导致接入网更加灵活和具有创新能力。5G 将催生新的应用，尤其是大量物联网（IoT, Internet of Things）应用。事实上，我们甚至可以看到“作为互联网前端的接入”的观点正在发生转变，因为接入网络本身就变成了云的集合，可以直接从“边缘云”提供新的服务。

本书的目标读者是那些对互联网和云计算有实际了解，但对蜂窝网络的无数专有名词了解不多的人。坦率的说，互联网有它的专有名词，但也提供了足够多的抽象集来帮助管理复杂性。对于蜂窝网络来说，情况就不一样了，没办法通过一条线索了解所有细节。还有一个原因，移动网络很大程度上被隐藏在专有设备中，这使得你不太可能自己把问题搞清楚。

本书是一位和我们在开源 5G 项目上合作的移动网络专家培训系统工程师的成果。该材料也被用于培训其他软件开发人员，我们希望它可以帮助任何想要更深入的了解 5G 及其提供的创新机会的人。想要亲手做一些实验的读者也可以访问书中介绍的开源软件。

在可预见的未来，这本书很可能还会不断的补充修订。它的目的并不是对每一个细节都采用百科全书式的视角和提供端到端完整性，但我们确实计划随着时间的推移充实内容。欢迎您对此提出建议（和贡献）。

# 致谢

本书中介绍的软件是 ONF 工程团队和开源社区辛勤工作的结果，感谢他们做出的贡献。感谢布鲁斯·戴维（Bruce Davie）、古鲁·帕鲁卡（Guru Parulkar）、金昌勋（Chang hoon Kim）对本书早期手稿提供的反馈。

Larry Peterson 和 Oguz Sunay

开放网络基金会

2020 年 3 月

# 1. 简介

与互联网类似，拥有 40 年历史的移动通信网络正在发生重大变化。前两代（1G 和 2G）支持语音和文本，3G 过渡到宽带接入，支持每秒数百千比特的数据速率。如今，该行业正处于 4G（支持的数据速率通常以每秒几兆计）阶段，并正在向 5G 过渡，数据速率有望进一步增长数十倍。

但 5G 不仅仅意味着更大的带宽。5G 融合了几个关键技术趋势，使其走上支持实现更多创新的道路，代表了无线接入网的根本性重构。就像 3G 定义了从语音到宽带的过渡一样，5G 的承诺主要是从单一接入服务（宽带连接）过渡到更丰富的边缘服务和设备。5G 预计将为沉浸式用户体验（如 AR/VR）、关键任务应用（如公共安全、自动驾驶）和物联网（IoT）提供支持。这些用例将包括从家用电器到工业机器人再到自动驾驶汽车等所有设备，因此 5G 将不仅支持人类通过智能手机访问互联网，还将支持大量自动设备并帮助它们一起工作。支持这些服务不仅仅是为单个用户提高带宽或减少延时。正如我们即将看到的，我们需要一个完全不同的边缘网络体系架构。

这个体系架构雄心勃勃，可以用三类功能来说明：

- 支持大规模物联网 (*Massive Internet-of-Things*)，包括超低能耗（10 年以上电池寿命）、超低复杂性（每秒 10 比特）和超高密度（每平方公里 100 万个节点）的设备。
- 支持关键任务控制 (*Mission-Critical Control*)，包括超高可用性（大于 99.999% 或“5 个 9”）、超低延迟（低至 1 毫秒）和极端移动性（高达 100 公里/小时）。
- 支持增强型移动宽带 (*Enhanced Mobile Broadband*)，峰值数据速率超过 1 Gbps，平均速率达到 100Mbps 以上，每平方公里总吞吐量达到 10 Tbps。

每一代移动通信网络都需要数十年的努力，因此这些目标不可能在一夜之间就实现。

除了这些接入网能力的量化改进之外，5G 被视为一个构建支持创新平台的机会。以前的接入网通常是针对已知的服务（如语音呼叫和短信）进行优化的，而互联网之所以获得巨大成功，很大程度上是因为它支持了广泛的应用程序，而这些应用程序在最初设计时甚至

都没有被想到过。5G 网络的设计在很大程度上也是为了实现超越我们今天所认知的应用之外的各种未来应用。

## 延伸阅读

要了解行业领袖对 5G 的宏伟愿景，请参阅高通在 2016 年 12 月发布的白皮书《让 5G NR 成为现实 (Making 5G NR a Reality) 》<sup>[1]</sup>。

5G 正处于发展过程中，这不是一个单点解决方案，而是包括了标准规范、一系列实现选择和一长串雄心勃勃的目标，因此留下了很大的解释空间。我们在本书中将基于两个相互支持的原则来介绍 5G。第一种是*应用系统视角*，也就是说，我们会介绍当前解决方案的一系列设计决策，而不只是把大量首字母缩写的术语或者单个技术作为*既成事实*。第二是解构这个体系。构建一个解耦的、虚拟化的、软件定义的 5G 接入网是该行业正在努力的一个发展方向（出于良好的技术和商业原因），但将 5G 网络分解成基本组件也是解释 5G 如何工作的最好方式。这也有助于说明 5G 在未来可能如何发展，以提供更多价值。

5G 没有单一、全面的定义，就像互联网没有单一、全面的定义一样。它是一个复杂的、不断发展的系统，由一组标准所限定，而这些标准会给予所有相关方不同程度的自由。在接下来的章节中，可以清楚的看到我们是在讨论*标准*（每个人都必须做什么才能进行互操作）、*趋势*（行业有可能走向何方）还是*实现选择*（具体的示例）。我们的目的是介绍 5G，通过全面采用系统视角，帮助读者浏览这个丰富而快速发展的系统。

## 演进路径

5G 正处于发展过程中，这是本书的中心主题。我们在此提请注意它的重要性，并将本书中再次讨论这个话题。

我们为那些了解多方面系统知识的人写这本书，目的是帮助社区快速理解这个系统（他们对蜂窝网络所知甚少），以便他们能够在 5G 发展过程中发挥作用。这是一个了解如何快速迭代以及构建健壮可扩展系统的最佳实践的社区，因此可以在实现 5G 的所有潜力方面发挥重要作用。

## 1.1. 标准全景图 (Standardization Landscape)

从 3G 开始，每一代移动通信都由 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, 第三代合作伙伴项目) 负责制定标准。尽管名称中有“3G”，但 3GPP 继续定义了 4G 和 5G 的标准，每一代标准都对应着该标准的一系列发布版本。第 15 版被认为是 4G 和 5G 之间的分界点，第 17 版定于 2021 年发布。4G 处于一个被称为 *LTE (Long Term Evolution, 长期演进)* 的多版本演进路径，这让相关术语更复杂了。5G 也在类似的发展道路上，在其生命周期内预计会有几个版本发布。

理解 4G 是理解 5G 的第一步，5G 在若干方面提升到了新高度，是超越 4G 的一个雄心勃勃的技术进步。在接下来的章节中，为了给介绍 5G 相应组件奠定基础，我们会介绍一些 4G 的架构特性。

和 Wi-Fi 一样，蜂窝网络在无线频谱中以特定的带宽传输数据。Wi-Fi 允许任何人使用 2.4 GHz 或 5 GHz（这些都是不需要授权的频段）频谱，而移动通信频谱则不一样，政府通过拍卖将各频段的独家使用权卖给移动运营商，后者反过来向用户出售移动接入服务。

此外，还有一个 3.5 GHz 的共享许可频段，称为 *CBRS (Citizens Broadband Radio Service, 公民宽带无线电服务)*，这一频段在北美地区专门用于蜂窝网络。其他国家也会预留类似作用的频谱。CBRS 允许三类用户共享频谱资源：第一使用权归该频谱的原始所有者（海军雷达和卫星地面站）；其次是优先用户，他们通过区域拍卖获得超过 10MHz 频段的三年使用权；最后，其他授权用户只需要先去中央数据库查一下注册用户信息，就可以接入和使用部分可用频段。CBRS 及其标准化工作将蜂窝网络扩展到非授权频段，为类似 Wi-Fi 的私人蜂窝网络打开了大门。

蜂窝网络的特定频段在世界各地都有所不同，而且由于运营商经常同时支持旧的遗留技术和新的下一代技术，每种技术占用不同的频段，让事情变得更加复杂。简单来说，传统的蜂窝网络频谱范围在 700-2400 MHz，新的中频谱分配在 6 GHz，毫米波 (mmWave) 为 24 GHz。



虽然具体频段与从架构角度理解 5G 没有直接关系，但它确实会影响物理层组件，进而对整个 5G 系统产生间接影响。我们将在后面的章节中确定并解释这些内容。确保分配的频谱得到有效利用也是一个关键的设计指标。

## 1.2. 接入网 (Access Networks)

蜂窝网络是实现互联网所谓最后一英里的接入网的一部分。其他接入技术包括 *PON (Passive Optical Networks, 无源光网络)*，俗称光纤入户。这些接入网由大大小小的网络运营商提供。像 AT&T (美国电话电报公司) 这样的全球网络运营商在像美国这样的国家的数千个汇聚点上运行接入网络，并通过全国主干网络将这些站点连接起来。小规模的区域和城市网络运营商可能会运行一个有一两个汇聚点的接入网，然后通过一些大型运营商的主干网访问互联网。

不管是哪种情况，接入网都在物理上部署在接近终端用户的数千个汇聚点上，每个汇聚点根据人口密度的不同服务于 1000 - 100,000 个用户。实际上，这些“边缘”位置的物理部署因运营商而异，但一种可能的方案是将蜂窝网和有线接入网络都部署在 TCO (Telco Central Offices, 电信核心机房)。

历史上，核心机房的正式名称为 *PSTN (Public Switched Telephone Network, 公共交换电话网)* 核心机房，是部署有线接入 (包括电话和宽带) 的，而蜂窝网络则通过部署一套平行的 *MTSO (Mobile Telephone Switching Offices, 移动电话交换机房)* 而独立发展。每个 MTSO 作为给定地理区域内的一组蜂窝基站的移动聚合点。对于我们而言，重要的是要知道有这样的聚合点存在，并且可以合理地认为它们定义了运营商管理的接入网的边缘。为了简单起见，我们有时使用术语“核心机房 (Central Office)”作为这两种边缘站点的同义词。

## 1.3. 边缘云 (Edge Cloud)

由于核心机房分布广泛，距离终端用户很近，因此也是承载边缘云的理想场所。但这又提出了一个问题：究竟什么是边缘云？

简而言之，云最初是一组仓库大小的数据中心组成，每个数据中心都提供了一种经济有效的方式给一组数量可伸缩的服务器提供能源、降温 and 运维的能力。随着时间的推移，这种共享基础设施降低了部署可伸缩互联网服务的门槛。不过现在有越来越多的应用程序需要低延迟和高带宽的云服务，但集中式数据中心无法有效实现这一需求。AR (Augmented Reality, 增强现实)、VR (Virtual Reality, 虚拟现实)、IoT (Internet-of-Things, 物联网) 和自动驾驶汽车都是这类应用的例子。这导致了一种趋势，一些功能将从数据中心转移到更接近最终用户的网络边缘。这个优势物理位置在哪里取决于你问的是谁。如果你问一个已经拥有并运营数千个核心机房的网络运营商，他们的核心机房就是一个显而易见的答案。而有些人可能会说是星巴克，其优势在于遍布全美的 14000 家星巴克咖啡店，还有人可能会指出遍布全球的数万个手机信号塔。

我们的解决方案本身是位置无关的，但值得指出的是，在云迁移到边缘的同时，还有一个趋势，那就是网络运营商使用和云服务商一样的通用硬件以及构建可伸缩软件的最佳实践重构接入网络。这种设计有时被称为 *CORD (Central Office Re-architected as a Datacenter, 核心机房重构为数据中心)*，它同时支持位于共享云平台上的接入网和边缘服务。该平台随后可以被复制到数百或数千个站点（包括但不限于核心机房）。因此，虽然我们不应该局限于把核心机房作为边缘云的唯一选项，但它正在成为一个可行的选择。

## 延伸阅读

CORD 最初应用于基于光纤的接入网络 (PON)，要了解其技术起源，请参见《IEEE Communications》2016 年 10 月版《将核心机房重新架构为数据中心 (Central Office Re-architected as a Datacenter)》<sup>[2]</sup>。

要理解 CORD (以及其他受 CORD 启发的技术) 的商业案例，请参阅 A.D. Little 在 2019 年 9 月发表的报告《谁敢赢! 接入转型如何快速推动运营商生产平台的发展 (Who Dares Wins! How Access Transformation Can Fast-Track Evolution of Operator Production Platforms)》<sup>[3]</sup>。

我们将以 CORD 为例，介绍 5G 如何在实践中实现的细节。目前，需要了解的重要事情是，5G 是作为运行在通用硬件上的软件实现的，而不是运行在过去几代所使用的专有硬

件上。这对我们如何看待 5G（以及如何描述 5G）有重大影响，5G 将日益成为云中的另一种基于软件的组件，而不是环绕在云外围的独立和专门的技术。

请记住，我们使用 CORD 作为示例并不意味着边缘云仅限于核心机房。因为 CORD 被设计为在一个公共平台上承载边缘服务和 5G 等接入技术，而电信核心机房是部署此类平台的一个可能地点，因此这是一个很好的例子。

从这次讨论中得到的一个重要结论是，了解云是如何构建的对于理解 5G 是如何实现的很有帮助。这包括使用通用硬件（包括服务器和白盒交换机）、水平可伸缩的微服务（也称为云原生）和 SDN（Software-Defined Networks，软件定义网络）。了解云软件是如何开发、测试、部署和运维的，包括 DevOps 和 CI/CD（Continuous Integration / Continuous Deployment，持续集成/持续部署）等实践，也很有帮助。

### 延伸阅读

如果你不熟悉 SDN，我们推荐一本配套的书：《软件定义网络：一种系统方法（Software-Defined Networks: A System Approach）》<sup>[4]</sup>。

如果您不熟悉 devops，或者不熟悉云服务商面临的运营问题，我们推荐《站点可靠性工程：谷歌如何运行生产系统（Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems）》<sup>[5]</sup>。

关于术语的最后一个注意事项。任何关注 5G 讨论的人肯定都听说过 NFV（Network Function Virtualization，网络功能虚拟化），它主要关注将曾经运行在专有硬件设备上的功能移植到通用服务器上的虚拟机（或者容器）中。根据我们的经验，NFV 是我们在本书中描述的完全解耦和云原生解决方案的基础，因此我们不打算详细讨论它。您可以认为 NFV 计划与本书所采用的方法基本一致，但一些具体的工程选择可能与这里描述的细节有所不同。

虽然将 NFV 等同于 5G 的实现选择完全没有问题，但还可以从另一个角度看待 NFV，而这个角度更好的反映了当前正在进行的架构迁移的本质。当电信公司开始 NFV 计划时，他们设想将云技术整合到他们的网络中，创建一个所谓的电信云（Telco Cloud）。然而实际情况是电信公司的接入技术被纳入云计算，作为另一种云托管工作负载运行，更

准确的说法是*基于云计算的电信系统 (Cloud-based Telco)*。阅读本书将帮助你看清所有这一切。

**Reference:**

- [1] <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/whitepaper-making-5g-nr-a-reality.pdf>
- [2] [https://wiki.opencord.org/download/attachments/1278027/PETERSON\\_CORD.pdf](https://wiki.opencord.org/download/attachments/1278027/PETERSON_CORD.pdf)
- [3] <https://www.adlittle.com/en/who-dares-wins>
- [4] <https://sdn.systemsapproach.org/>
- [5] <https://landing.google.com/sre/books/>

## 2. 无线传输 (Radio Transmission)

对于任何熟悉无线接入技术（如 Wi-Fi）的人来说，蜂窝网络最独特的地方在于它可以在众多用户之间共享可用的无线电频谱，同时允许这些用户在移动时保持连接。这就产生了一种高度动态和自适应的方法，其中编码、调制和调度起着核心作用。

正如我们将在本章中看到的，蜂窝网络使用基于预留（reservation-based）的策略，而 Wi-Fi 则是基于竞争（contention-based）。这种差异根源于每个系统对利用率的基本假设：Wi-Fi 假定网络负载较轻（因此在无线链路空闲时尽量进行传输，在检测到竞争时退出），而 4G/5G 蜂窝网络假定（并争取）高利用率（因此明确的将可用无线电频谱的不同“份额”分配给不同用户共享使用）。

首先，我们简要介绍一下无线传输，为理解 5G 架构的其余部分打下基础。以下内容并不是对该主题的理论介绍，而是为接下来介绍 5G 无线通信系统的实现奠定基础。

### 2.1. 编码与调制 (Coding and Modulation)

移动通信信道要实现可靠的数字数据传输，需要克服许多危害，包括噪声、衰减、失真、衰落和干扰。这个挑战是通过编码和调制的组合来解决的，如图 1 所示。



图 1. 编码和调制在移动通信中的作用。

编码的核心是在数据中插入额外的比特，以帮助从所有干扰信号传播的环境因素中恢复数据。这通常意味着某种形式的 *FEC* (*Forward Error Correction*, *前向错误纠正*) (例如，turbo 码，极坐标码)。调制产生代表编码数据流的信号，并且适配对应的信道参数：首先，基于可观测信道干扰，使用某个数字调制信号格式最大化每秒可靠传输的比特数量；其次，使用脉冲整形匹配传输带宽和信道带宽；最后，使用射频调制将信号转换为电磁波，在指定的载波频率 (*carrier frequency*) 上传输。

为了更深入地了解通过空气传播无线电信号从而进行可靠数据传输所面临的挑战，请考虑图 2 中所描述的场景，其中信号从各种静止和移动的物体表面反射，从发射端到接收端可能有多条传输路径，并且两端可能都在移动中。

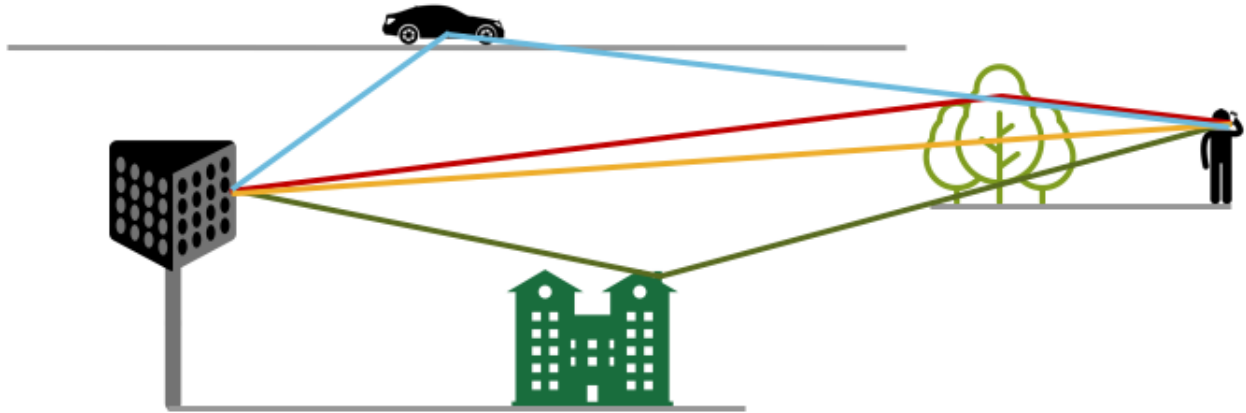


图 2. 信号从发射机到接收机沿着多条路径传播。

作为多径传输的结果，原始信号到达接收端后会随着时间扩散，如图 3 所示。经验证据表明，在城市环境中，多径扩展（Multipath Spread，即一次传输的第一个和最后一个信号到达接收端的时间）为  $1\text{-}10\mu\text{s}$ ，在郊区环境中为  $10\text{-}30\mu\text{s}$ 。这些多路径信号可能会互相干扰，从而使得信号增强或减弱，而且这种干扰会随着时间而变化。在一定的时间内，可以假定信道是不变的，这一理论界限被称为相干时间，记为  $T_c$ ，由下式计算得出： $T_c = c/v \times 1/f$ 。其中  $c$  为信号的速度， $v$  为接收端的运动速度（例如，移动的汽车或火车）， $f$  为被调制的载波信号的频率。这说明相干时间与信号的频率和运动速度成反比，这很直观：频率越高（波长越短）相干时间越短，同样，接收端运动越快相干时间越短。根据该模型的目标参数（基于目标物理环境选择），可以计算  $T_c$ ，从而限制信号在不存在过度干扰风险的情况下可以传输的速率。无线信道的动态特性是蜂窝网络中需要解决的主要问题之一。

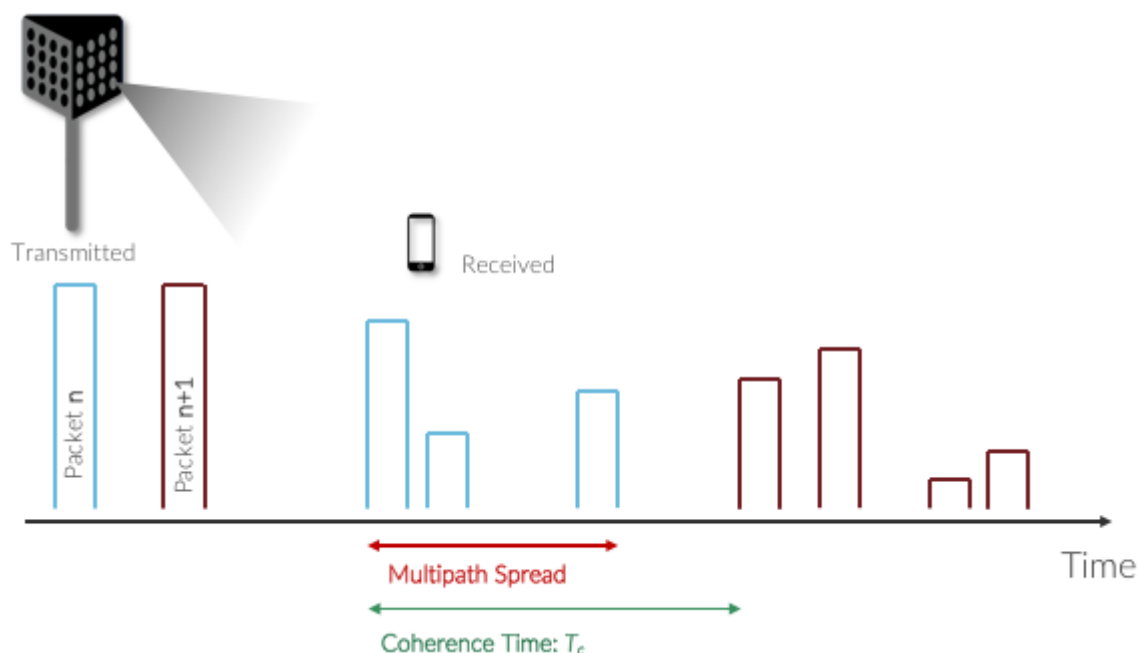


图 3. 由于多径传输，接收到的数据会随时间扩散。

更复杂的是，图 2 和图 3 暗示传输来自单个天线，但蜂窝基站配备了天线阵列，每个天线在不同的（但有重叠的）方向上发射。这种技术被称为 *MIMO* (*Multiple-Input-Multiple-Output*, 多输入多输出)，它在环境造成的多径传输的基础上增加了更多的路径，有意识的在接收端之间通过从多个路径传输数据。

这样造成的结果是，发送端必须从每个接收端接收反馈，以判断如何最好地利用无线资源为他们服务。3GPP 为此定义了 *CQI* (*Channel Quality Indicator*, 信道质量指示器)。在实际操作中，接收端定期（例如，在 LTE 中是每 1 ms）向基站发送一个 CQI 状态报告。这些 CQI 消息上报观测到的信噪比，信噪比会影响接收端恢复数据的能力。然后，基站利用这些信息调整如何将可用的无线电频谱分配给它所服务的用户，以及采用哪种编码和调制方案。所有这些决定都是由调度器做出的。

## 2.2. 调度器

每一代蜂窝网络最重要的特性之一就是调度器如何完成它的工作，而这又取决于多路复用机制。例如，2G 使用 *TDMA* (*Time Division Multiple Access*, 时分多址)，3G 使

用 *CDMA* (*Code Division Multiple Access*, 码分多址)。数据如何复用也是 4G 和 5G 的一个主要区别, 它完成了从基本电路交换到基本分组交换蜂窝网络的过渡。

4G 和 5G 都基于 *OFDM* (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, 正交频分复用), 即在多个正交子载波频率上复用数据, 每个子载波都是独立调制的。*OFDM* 的价值和效率在于如何选择子载波频率以避免干扰, 即如何实现正交性。这个话题超出了这本书的范围。相反, 我们采取了一个非常抽象的多路复用的观点, 专注于“无线频谱的离散可调度单元”, 而不是产生这些可调度单元的信号和调制机制。

首先, 我们深入研究这些可调度单元。在最后一节, 我们回到更广泛的问题, 即有效利用频谱的空中接口。

## 4G 中的多路复用

4G 下行传输多路复用技术被称为 *OFDMA* (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*, 正交频分多址), 这是 *OFDM* 的一种特殊应用, 它将数据在一组 12 个正交子载波频率上复用, 每个子载波频率都是独立调制的<sup>注 1</sup>。*OFDMA* 中的“多址接入”意味着可以代表多个用户同时发送数据, 每个用户使用不同的子载波频率和不同的时间段。子频带很窄 (例如 15kHz), 但将用户数据编码为 *OFDMA* 符号的设计是为了将相邻频带之间的干扰造成的数据丢失风险降至最低。

注 1: 对于上行传输 (从用户设备到基站), 4G 使用了不同的多路复用策略, 但 5G 使用了不同的方法, 所以我们不打算在这里描述。

*OFDMA* 的使用自然而然的导致了将无线电频谱概念转化为 2-D 资源, 如图 4 所示。最小可调度单元, 称为 *RE* (*Resource Element*, 资源单元), 对应于一个副载波频率周围的 15kHz 频带和传输一个 *OFDMA* 符号所需的时间。每个符号可以编码的比特数取决于调制速率, 例如使用 *QAM* (*Quadrature Amplitude Modulation*, 正交振幅调制), 16-QAM 每符号产生 4 比特, 64-QAM 每符号产生 6 比特。



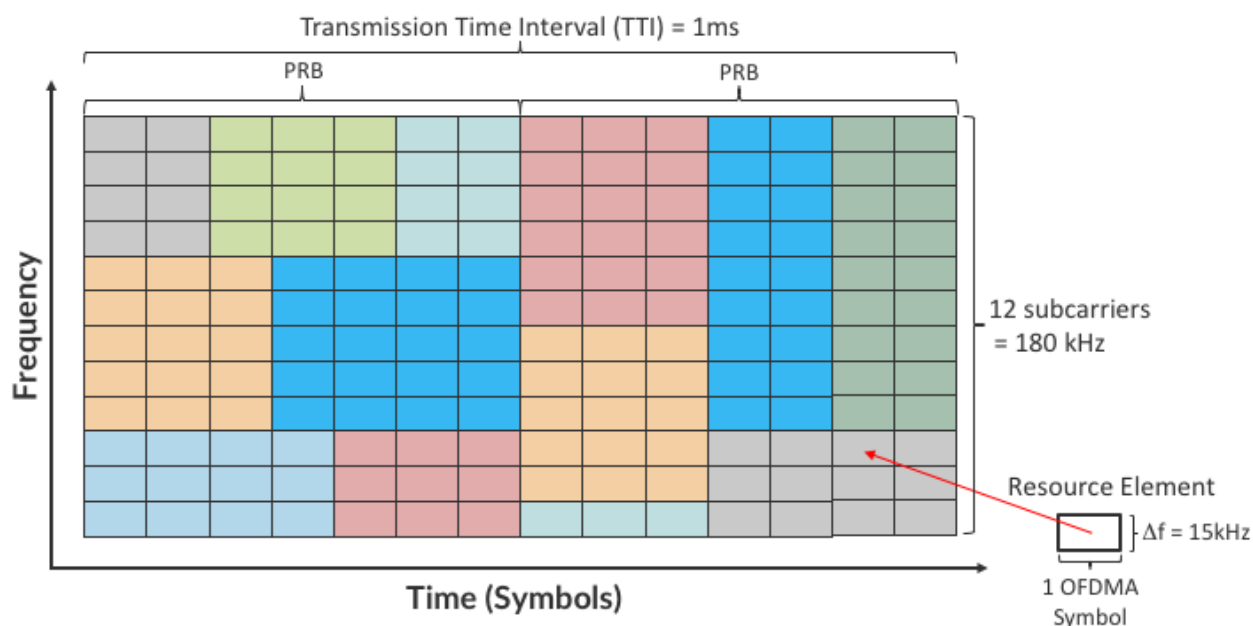


图 4. 频谱抽象表示为可调度资源元素的二维网格。

调度器在每 1 ms 的 *TTI* (*Transmission Time Interval*, 传输时间间隔) 期间为每个有数据要传输的用户分配一些 RE, 图 4 中用不同颜色的块表示不同的用户。调度器必须在  $7 \times 12 = 84$  个 RE 的块 (*PRB*, *Physical Resource Block*, 物理资源块) 上做出分配决策, 这是它唯一的约束。图 4 显示了两个连在一起的 PRB。当然, 时间继续沿着 X 轴往前流动, 根据可用频段的大小 (例如, 可能是 100 MHz 宽), 可能会有更多的副载波空槽 (以及 PRB) 出现在 Y 轴上, 所以调度器本质上是在准备和发送一系列的 PRB。

请注意, OFDMA 不是编码/调制算法, 而是为每个子载波频率提供一个选择特定编码和调制器的框架。QAM 就是一个常见的调制器。调度器的责任是根据它收到的 CQI 反馈来选择每个 PRB 使用的调制方式。调度器也在每个 PRB 的基础上选择编码, 例如, 如何设置 turbo 编码算法的参数。

1 ms TTI 是调度程序从用户那里接收关于他们正在体验的信号质量反馈的时间段。这就是前面提到的 CQI, 每个用户每 1 ms 发送一组指标, 调度器使用这些指标来决定如何在随后的 TTI 期间分配 PRB。

调度决策的另一个输入是 *QCI* (*QoS Class Identifier*, QoS 类标识符), 它表示每一类流量将要获得的服务质量。在 4G 中, 每个类 (总共有 9 个类) 的 QCI 值表示流量

是否具有 GBR (Guaranteed Bit Rate, 保证比特率) \*或者非 GBR, 以及该 QoS 类在这两类中的相对优先级。

最后, 请记住, 图 4 着重于从单个天线调度传输, 但是上面描述的 MIMO 技术意味着调度程序还必须确定哪个天线 (或者更普遍地说, 哪个天线子集) 将最有效地到达每个接收端。不过还是需要抽象出调度器, 负责分配一系列 RE。

所有这些都提出了一个问题: 调度器如何决定在给定的时间间隔内服务哪一组用户? 为每个用户分配多少资源元素? 如何选择编码和调制电平? 以及在哪个天线上传输数据? 这是一个优化问题, 不过我们不打算在这里解决这些问题。我们的目标是描述一个允许其他人设计和插入有效调度程序的体系结构。保证蜂窝架构对这类创新的开放是我们的目标之一, 正如我们将在下一节中看到的, 为调度器操作提供更多的选择将在 5G 中变得更加重要。

## 5G 中的多路复用

从 4G 到 5G 的过渡为无线电频谱调度带来了额外的灵活性, 使蜂窝网络能够适应更多样化的设备和应用领域。

本质上, 5G 定义了一系列波形 (waveforms), 而 LTE 只指定了一种波形, 每种波形都针对无线电频谱中的不同频段进行了优化<sup>注 2</sup>。载波频率低于 1GHz 的频段旨在提供大部分人关心的移动宽带和大规模物联网服务。1-6 GHz 之间的载波频率旨在提供更高的带宽, 专注于移动宽带和关键任务应用。24 GHz (mmWaves) 以上的载波频率被设计为在视距范围内提供超宽带服务。

注 2: 波形是与信号的频率、振幅和相移无关的特性 (形状), 正弦波就是一个例子。

这些不同的波形会影响调度和子载波间隔 (即前一节中描述的 RE 的“大小”)。

- 对于 sub-1 GHz 频段, 5G 最大允许 50 MHz 带宽。在这种情况下, 有两种波形: 一种副载波间距为 15 kHz, 另一种为 30 kHz。(在图 4 所示的示例中, 我们使用了 15 kHz。) 对应的调度间隔分别为 0.5 ms 和 0.25 ms。(在图 4 所示的示例中, 我们使用了 0.5 ms。)

- 对于 1-6 GHz 频段，最大带宽可达 100 MHz。对应的子载波间隔为 15、30、60 kHz 的三种波形，对应的调度间隔分别为 0.5、0.25、0.125 ms。
- 对于毫米波段，带宽可能高达 400 MHz。有两种波形，子载波间隔为 60 kHz 和 120 kHz。两者的调度间隔都是 0.125 ms。

这些副载波间隔和调度间隔的不同配置有时被称为无线空口的*配置参数 (numerology)*。

这个配置参数的范围很重要，因为它为调度器增加了另一个选择。除了向用户分配无线电资源外，它还能够通过改变所使用的波形来动态调整资源的大小。有了这种额外的选项，固定大小的 RE 不再是资源分配的主要单位。相反，我们使用更抽象的术语，并讨论向用户分配*资源块 (Resource Blocks)*，5G 调度器决定在每个时间间隔内分配的资源块的大小和数量。

图 5 从更抽象的角度描述了调度器的角色，与 4G 一样，来自接收端的 CQI 反馈和用户选择的 QCI 服务质量类是调度器输入的两个关键参数。请注意，QCI 取值范围在 4G 和 5G 是不一样的，这反映了支持的差异化越来越大。对于 5G，每个类别包括以下属性：

- 资源类型 (Resource Type) : GBR (Guaranteed Bit Rate)、Delay-Critical GBR、Non-GBR
- 优先级水平 (Priority Level)
- 包时延冗余 (Packet Delay Budget)
- 包错误率 (Packet Error Rate)
- 平均窗口 (Averaging Window)
- 最大数据量 (Maximum Data Burst)

注意，虽然前面的讨论可以解释为用户和 QCI 之间存在一对一的关系，但更准确的说法是，每个 QCI 都与一类流量相关联（通常对应于某种类型的应用程序），某个用户可能在任何给定时间发送和接收属于多个类的流量。我们将在后面的章节中更深入地探讨这个概念。

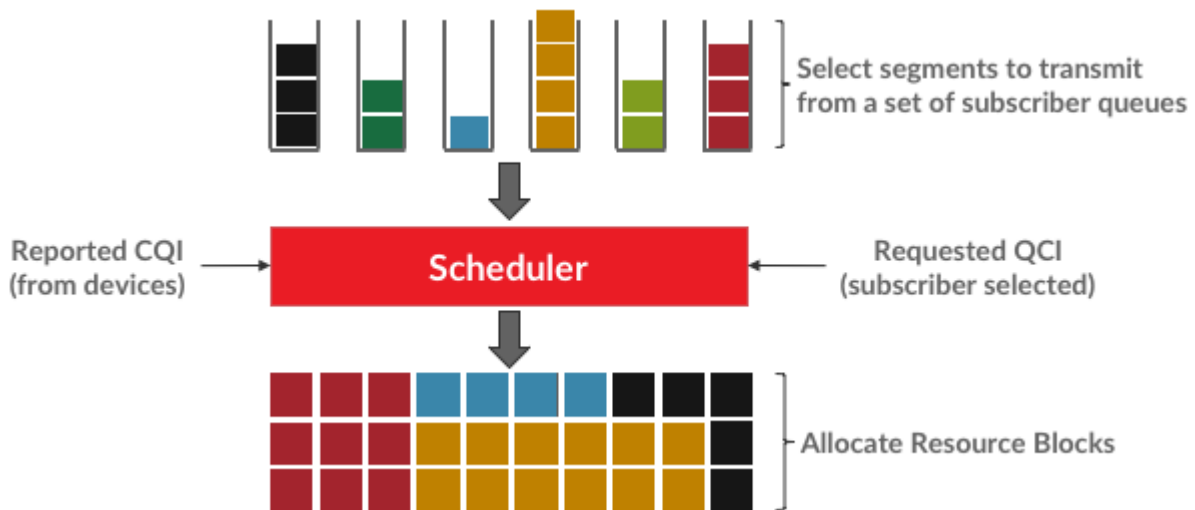


图 5. 调度器根据接收端的 CQI 反馈以及与每一类服务相关联的 QCI 参数，将资源块分配给用户数据流。

## 2.3. New Radio (NR)

最后，我们注意到，虽然前一节将 5G 描述为在数据传输调度中引入了额外的选择，但最终结果是一个质量上更强大的无线电。这个新的 5G 空口规范，通常被称为 *New Radio (NR)*。它实现了三个新的用例，远远超出了简单的增加带宽的范围：

- eMBB (Extreme Mobile Broadband, 超带宽服务)
- uRLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, 超可靠低延时服务)
- mMTC (Massive Machine-Type Communications, 大规模物联网服务)

这三个用例都符合第一章中介绍的需求，都可以归因于 5G 在无线空口上针对多路数据传输进行的四个基本改进。

第一个改进是前一节中提到的：能够改变波形。这有效地引入了动态更改可调度资源单元的大小和数量的能力，这为制定对可预测、低延迟通信至关重要的细粒度调度决策打开了大门。

第二个改进与“多接入”有关，即不同的流量源如何在可用频谱上进行复用。在 4G 中，下行流量在频域和时域都进行多路复用（如 2.2 节所述），而上行流量只在频域进行多

路复用。5G NR 可在时域和频域都实现上下行业务的复用，这样做可以提供对延迟敏感的应用程序所需的更细粒度的调度控制。

第三个改进与 5G NR 可用的新频谱有关，24 GHz 以上的毫米波尤其重要。这不仅是因为更大的容量——这使得为需要低延迟通信的关键任务应用程序留出专门的容量成为可能——而且因为更高的频率使得更细粒度的资源块（例如，调度间隔短至 0.125 ms）成为可能。同时，更低的调度间隔使不能容忍延迟不可预测的应用程序受益。

第四，为大量物联网设备提供移动连接，从需要移动支持的低速设备（如可穿戴设备、资产跟踪器）到支持间歇传输几个字节数据的设备（如传感器、仪表）。这些设备都对延迟不敏感，带宽消耗也比较小，但挑战在于它们需要很长的电池寿命，因此从设计上降低了硬件复杂度，从而消耗更少的能源。

对 IoT 设备的支持主要围绕将一些可用无线电频谱分配给一个轻量级（简化）空中接口。这种方案从 LTE 的第 13 版开始，并通过两种互补的技术：mMTC 和 NB-IoT（NarrowBand-IoT，窄带物联网）来实现。这两种技术都建立在大大简化的 LTE 版本上，限制了为更高频谱利用率所需的配置参数和灵活性，从而允许更简单的物联网硬件设计。mMTC 提供高达 1 Mbps 的 1.4 MHz 带宽，NB-IoT 提供几十 kbps 的超过 200 kHz 的带宽，因此才有了窄带（NarrowBand）这个术语。这两项技术的设计支持每平方公里超过 100 万个设备。在第 16 版中，这两种技术都可以在 5G 频段内运行，但仍基于 LTE 配置参数。从第 17 版开始，作为 mMTC 的演进，将推出更简单的 5G NR 版本，称为 NR-Light，预计 NR-Light 将进一步提升设备接入密度。

这四个改进的结果是，5G NR 旨在支持可用带宽的分区，将不同的分区动态分配给不同类别的流量（例如，高带宽、低延迟和低复杂性）。这就是切片（slicing）的本质，我们将在本书中反复讨论这个想法。此外，一旦有不同需求的流量可以由不同的切片提供服务，5G NR 的多路复用方法就足以支持针对这些切片提供不同的调度决策，每个切片都为目标流量量身定制。

## 3. 基础架构 (Basic Architecture)

本章介绍移动接入网的主要架构组件，着重于 4G 和 5G 共同的组件，为理解后面章节中介绍的 5G 高级特性奠定基础。

本书主要是概要性的介绍 3GPP 中的术语，对于熟悉互联网的人来说，这些术语可能看起来很随意（例如，“eNB”是一个“基站”），但重要的是要记住，这个术语来自于 3GPP 标准化的过程，它始终关注电信领域，几乎完全与 IETF 和其他互联网相关组织没有联系。更让人困惑的是，3GPP 的术语常常随着每一代的变化而变化（例如，在 4G 中一个基站被称为 eNB，在 5G 中被称为 gNB）。我们通过使用通用术语（例如基站）来解决这种问题，并仅在需要区分时引用特定的 3GPP 的对应术语。

### 延伸阅读

这个例子只是术语的冰山一角。关于 5G 术语的复杂性，请参阅 Marcin Dryjanski 2018 年 7 月的文章：《LTE 和 5G 差异：系统复杂性 (LTE and 5G Differences: System Complexity)》<sup>[1]</sup>。

### 3.1. 主要组件

蜂窝网络为移动中的设备提供无线连接，这些设备被称为\*UE (User Equipment, 用户设备)，传统上与智能手机和平板电脑相对应，但将越来越多地包括汽车、无人机、农业机械、机器人、家用电器、医疗设备等。

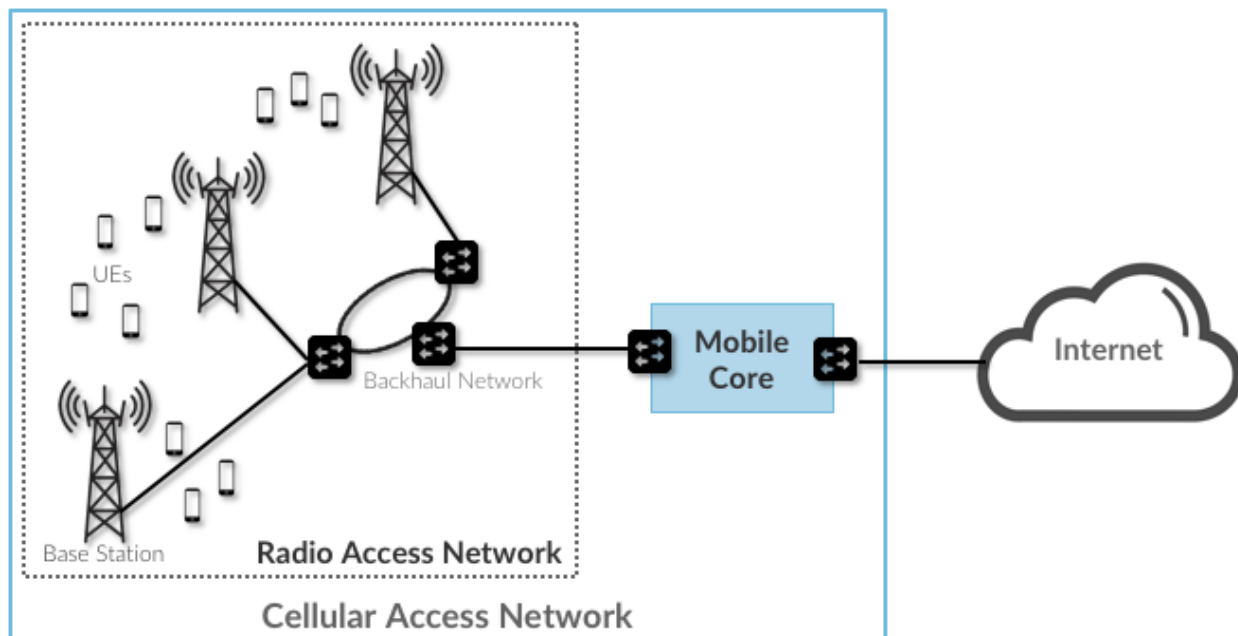


图 6. 蜂窝网络由无线接入网(RAN)和移动核心网组成。

如图 6 所示，蜂窝网络由两个主要的子系统组成：*RAN* (*Radio Access Networks*, 无线接入网) 和 *移动核心网* (*Mobile Core*)。RAN 管理无线电频谱，确保其得到有效利用，并满足每个用户的服务质量要求，它体现为一组分布式的基站集合。如上所述，在 4G 中，这些节点被命名为 *eNodeB* (或 *eNB*)，这是 *evolved Node B* 的缩写。在 5G 中，它们被称为 *gNB* (*g* 代表“下一代，next Generation”)。

移动核心网不是一个单独的设备，而是一组功能的集合，为多个目的服务：

- 为数据和语音服务提供互联网 (IP) 连接。
- 确保连接性满足承诺的 QoS 要求。
- 跟踪用户移动性，确保服务不中断。
- 跟踪用户的使用情况以进行计费 and 收费。

注意，移动核心网是另一个通用术语。在 4G 中被称为 *EPC* (*Evolved Packet Core*, 演进的分组核心网)，在 5G 中被称为 *\*NG-Core* (*Next Generation Core*, 下一代核心网，另一个更常用的术语是 *5GC*)。

尽管其名称中有“核心”一词，但从互联网的角度来看，移动核心网仍然是接入网的一部分，作为一座高效的桥梁，将某个区域的 RAN 和更大的基于 IP 的互联网连接了起来。

3GPP 在移动核心网的部署位置方面提供了很大的灵活性，但对于我们的目的来说，可以假设每个移动核心网都服务于一个大的城市区，相应的 RAN 将包括几十个（甚至数百个）手机发射塔。

仔细看一下图 6，我们可以看到一个回传网络 (Backhaul Network) 将基站与移动核心网连接起来。这个网络通常是有线的，可能有也可能没有图中所示的环形拓扑，通常是由其他商用组件构建。例如，实现光纤到户的 PON (Passive Optical Network, 无源光网络) 是实现 RAN 回传的首选。回传网络显然是 RAN 的必要组成部分，但它只是实现选择之一，并不是 3GPP 标准所规定的。

尽管 3GPP 在一个开放标准中指定了实现 RAN 和移动核心网的所有要素（包括我们还没有引入的子层），但网络运营商在历史上习惯于从单个供应商手中购买每个子系统的专有实现。缺乏开源实现导致蜂窝网络普遍“不透明”，RAN 尤其如此。虽然 eNodeB 的实现确实包含了在无线电频谱上调度传输的复杂算法（这些算法被认为是设备供应商的宝贵知识产权），但同时开放和解耦 RAN 和移动核心网的机会还是很大的。下面两个章节将依次介绍这两个部分。

在进入这些细节之前，图 7 重新绘制了图 6 中的组件，以突出两个重要的区别。首先，一个基站有一个模拟组件（由天线表示）和一个数字组件（由一对处理器表示）。其次，移动核心网被划分为控制面 (Control Plane) 和用户面 (User Plane)，这类似于熟悉互联网的人所理解的控制/数据平面。（3GPP 最近引入了一个对应的缩写——CUPS, *Control and User Plane Separation*——来表示这个想法。）在接下来的讨论中，我们将解释这两个区别的重要性。

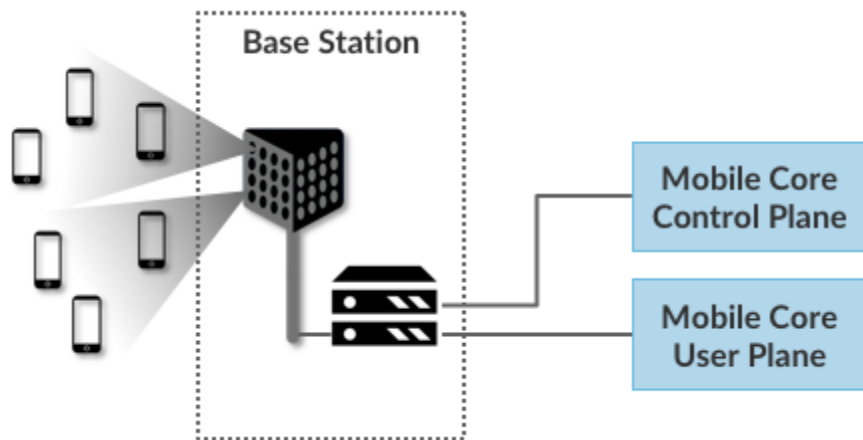




图 7. 移动核心网分为控制面和用户面，这是一个被称为 CUPS 的架构：控制和用户平面分离

## 3.2. 无线接入网 (Radio Access Network)

接下来，我们通过介绍每个基站所扮演的角色来描述 RAN。请记住，这有点像通过解释路由器的工作原理来描述互联网——这是一个合适的起点，但并没有完全覆盖端到端的所有场景。

首先，每个基站在用户的 UE 通电以后，或者说当 UE 处于活跃状态时，为其建立无线信道。如果 UE 在一段时间内保持空闲状态，此通道将被释放。在 3GPP 的术语里，这个无线信道提供*承载服务 (bearer service)*。术语“承载 (bearer)”历来被电信行业（包括早期的有线技术，如 ISDN）用来表示数据通道，而不是承载信令信息的通道。

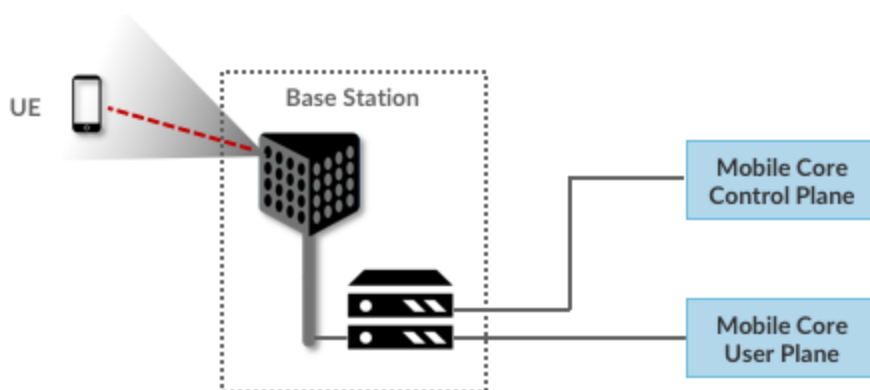


图 8. 基站检测(并连接)活跃 UE。

其次，每个基站在 UE 和对应的移动核心网控制面组件之间建立“3GPP 控制面”连接，并在两者之间转发信令流量。该信令流量支持 UE 认证、注册和移动性跟踪。

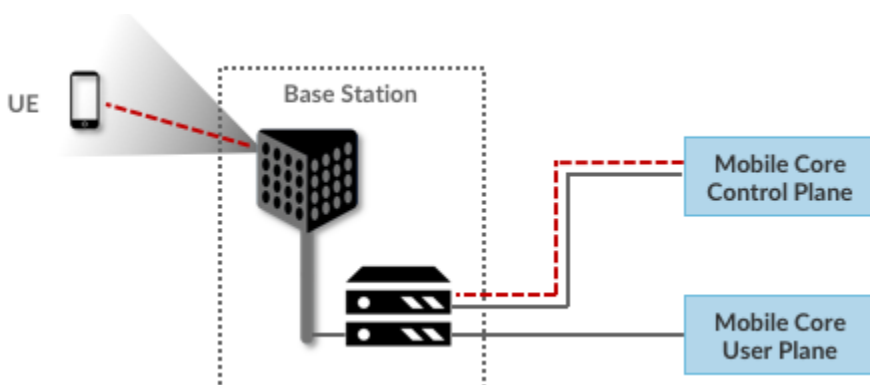


图 9. 基站在每个 UE 和移动核心网之间建立控制平面连接。

第三，对于每个活跃 UE，基站在相应的移动核心网用户面组件之间建立一个或多个隧道。

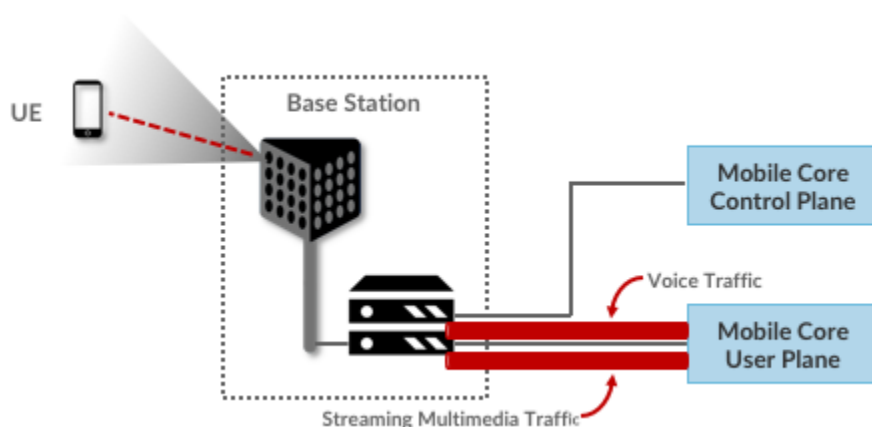


图 10. 基站在每个 UE 和移动核心网用户面之间建立一个或多个隧道。

第四，基站在移动核心网和 UE 之间转发控制和用户平面数据包。这些数据包分别通过 SCTP/IP 和 GTP/UDP/IP 进行隧道传输。SCTP (Stream Control Transport Protocol, 流控制传输协议) 是替代 TCP 的可靠传输协议，专门用于为电话服务传送信令 (控制) 信息。GTP (General Packet Radio Service Tunneling Protocol, 通用分组无线电服务隧道协议) 是 3GPP 定义的基于 UDP 的隧道协议。

另外，值得注意的是，RAN 和移动核心网之间的连接是基于 IP 的。这是从 3G 到 4G 的主要变化之一。在 4G 之前，蜂窝网络的内部是基于电路传输的。这也很好理解，因为它最初就是一个电话网络。

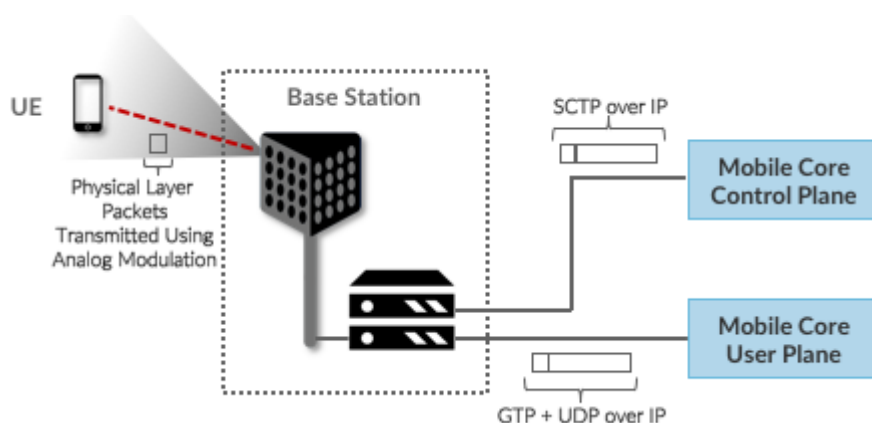


图 11. 基站到移动核心网（以及基站到基站）的控制面通过 SCTP/IP 隧道传输，用户面通过 GTP/UDP/IP 隧道传输。

第五，每个基站利用直连的站到站链路与相邻基站协调 UE 切换。和上图所示的基站到核心网的链接一样，这些链路用于传输控制面（SCTP over IP）和用户面（GTP over UDP/IP）数据包。

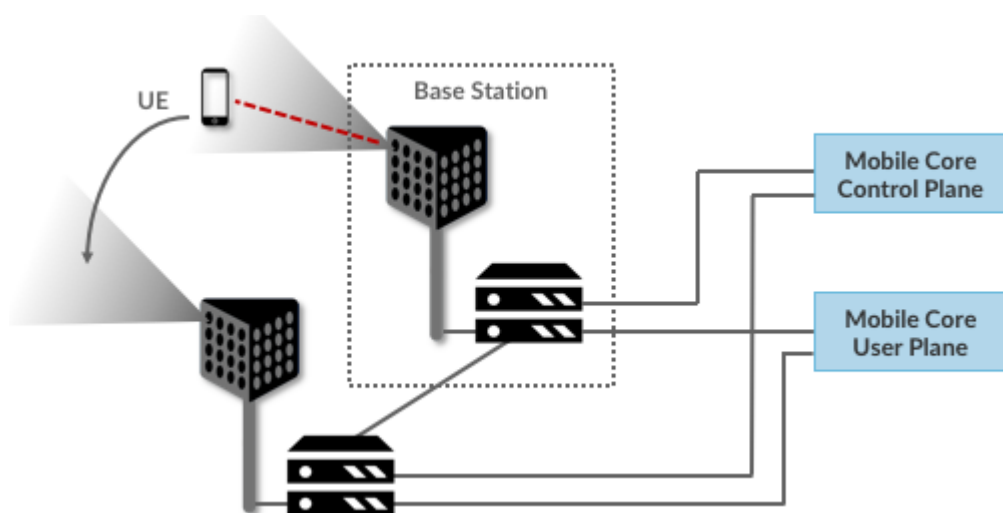


图 12. 基站配合完成 UE 切换。

第六，基站协调从多个基站向一个 UE 进行无线多点传输，该流程也许是 UE 切换的一部分，也可能不是。

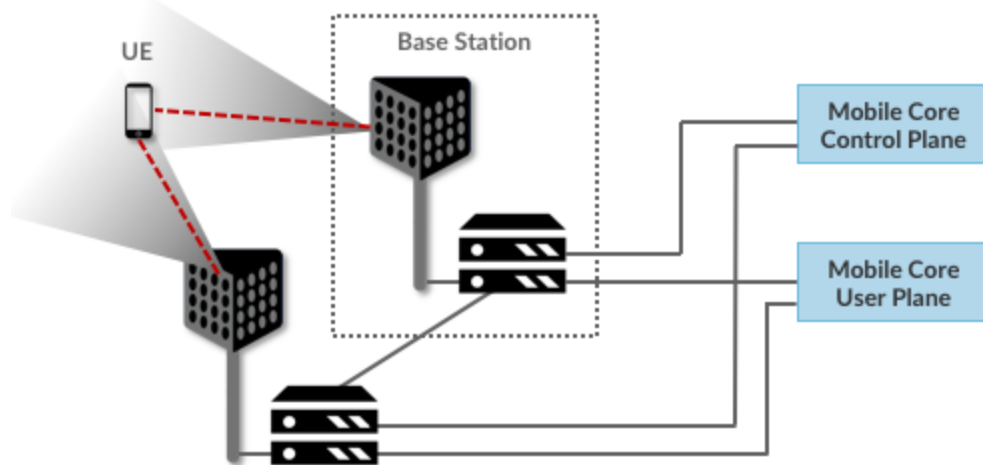


图 13. 基站之间相互协作，实现到 UE 的多径传输(链路聚合)。

通过上面的介绍，我们可以看到，基站基本上可以被视为一个专门的转发器。在网络到 UE 的方向上，基站把即将发送的 IP 包封装为物理层分片，将其调度到可用的无线频谱上进行传输。在 UE 到网络的方向上，基站把物理层分片组装为 IP 包，通过 GTP / UDP / IP 隧道发送到的上游移动核心网用户面。此外，基站根据观测到的无线信道质量和用户策略，决定 (a) 直接将数据包转发给 UE，还是 (b) 通过相邻基站间接转发给 UE，或者 (c) 利用多径传输到达 UE。第三种情况可以选择将物理负载分散到多个基站或者单个基站的多个载波频率（包括 Wi-Fi）上。

请注意，正如第二章无线传输所述，调度是复杂的，需要考虑很多情况，甚至在做出只会影响到单个基站的决策时也是一样。我们现在看到，还需要考虑全局因素，需要决策是否将流量转发到不同的（多个）基站，从而在更大的地理区域内有效利用频谱资源。

换句话说，RAN 作为一个整体（即不仅仅是单个的基站），不仅支持切换（移动性的显著要求），而且还支持链接聚合（*link aggregation*）和负载均衡（*load balancing*），这些机制对任何理解互联网的人来说都很熟悉。我们将在后面的章节中重新讨论如何利用 SDN 技术来做出这种 RAN 级别（全局）的决策。

### 3.3. 移动核心网（Mobile Core）

移动核心网的主要功能是向移动用户提供数据网络（即互联网）连接，同时确保验证用户身份，以及保证他们体验到的服务质量满足承诺的 SLA。移动核心网通过追踪所有用户在基站粒度上的最后位置来管理用户的移动性，这是移动核心网的一个重要功能。事实上，为了追踪个人用户的移动（而这是互联网做不到的），使得移动核心网架构非常复杂。

当我们从 4G 迁移到 5G 时，总体功能基本保持不变，变化的是相关功能如何被虚拟化和以及解耦。5G 移动核心网在很大程度上受到了云计算向微服务（云原生）架构演进的影响。由于向云原生的演进打开了定制化的大门，使得这种转变比最初看起来要深刻的多。5G 移动核心网不仅支持语音和宽带连接，还可以发展到支持海量物联网。海量物联网具有完全不同的延迟需求和使用模式（即更多设备的间歇性连接），这就需要用一种会话管理方案适配多种业务模型。

## 4G 移动核心网

4G 移动核心网在 3GPP 的官方名称是 EPC (Evolved Packet Core)，由五个主要组件组成，前三个在控制面 (CP) 运行，后两个在用户面 (UP) 运行。

- MME (Mobility Management Entity, 移动性管理实体)：在 RAN 中跟踪和管理终端的移动，包括记录终端何时停止活动。
- HSS (Home Subscriber Server, 归属用户服务器)：包含所有注册用户相关信息的数据库。
- PCRF (Policy & Charging Rules Function, 策略与计费规则功能单元)：跟踪和管理策略规则，记录用户流量的计费数据。
- SGW (Serving Gateway, 服务网关)：负责转发与 RAN 之间的 IP 报文。将承载服务的移动核心网锚定到 (可能是移动的) UE，涉及从一个基站到另一个基站的切换。
- PGW (PDN (Packet Data Network) Gateway, PDN 网关)：本质上是一个 IP 路由器，将移动核心网连接到外部互联网。支持附加的访问相关功能，包括策略执行、流量整形和计费。

虽然面向 RAN 的 SGW 和面向互联网的 PGW 被定义为不同的组件，但在实践中，它们通常被组合在一个设备中，被称为 S/PGW。最终结果如图 14 所示。

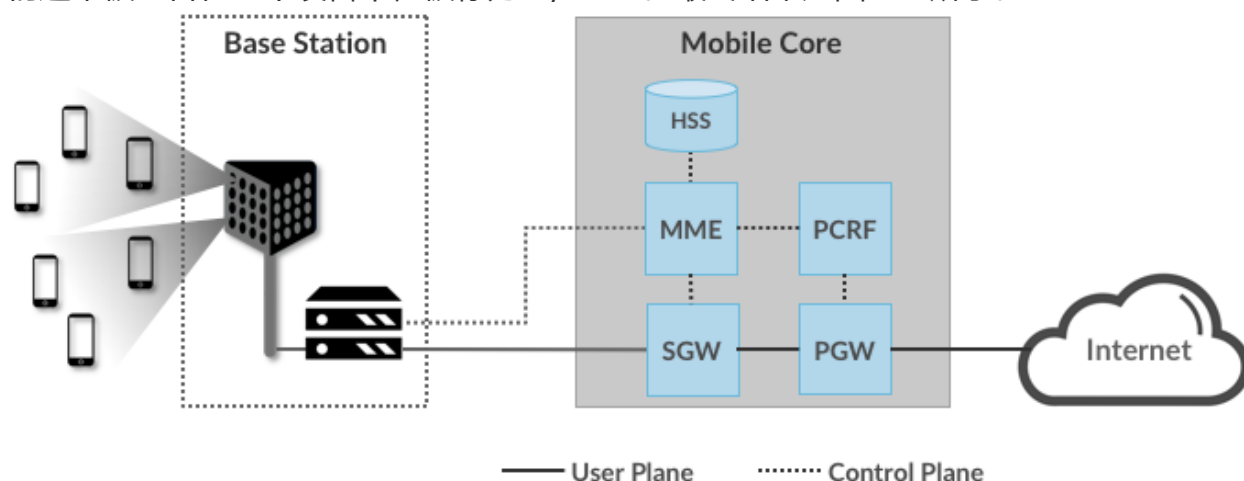


图 14. 4G 移动核心网(EPC)。

请注意，3GPP 在如何部署移动核心网组件以服务于某个地理区域方面保持了灵活开放的态度。例如，一组 MME/PGW 可能为一个城市提供服务，SGW 部署在遍布整个城市的大约 10 个边缘站点上，每个站点为大约 100 个基站提供服务。但是规范并没有限定部署配置，可以自行选择。

## 5G 移动核心网

5G 移动核心网（3GPP 称之为 NG-Core）采用了类似微服务的架构，之所以称之为“类似微服务”，是因为尽管 3GPP 规范分解了这一层次的功能，但实际上只是规定了一组功能模块，而不涉及实现。一组功能模块与设计一个基于微服务的系统的工程决策是完全不同的。换句话说，可以将图 15 中所示的组件集合视为一组微服务，这是一个不错的工作模型。

下面将功能模块组织为三组。第一组是控制面（CP）功能，在 EPC 中有对应模块。

- AMF (Core Access and Mobility Management Function, 接入和移动管理功能)：负责连接和可达性管理、移动管理、接入认证和授权、位置服务，提供 EPC 中 MME 的移动性管理功能。
- SMF (Session Management Function, 会话管理功能)：管理 UE 会话，包括 IP 地址分配、选择关联的 UPF、QoS 控制、UP 路由控制，大致对应于 EPC 中 MME 的部分功能以及 PGW 的控制相关功能。
- PCF (Policy Control Function, 策略控制功能)：管理其他控制面功能的策略规则，大致相当于 EPC 的 PCRF。
- UDM (Unified Data Management, 统一数据管理功能)：管理用户身份信息，生成鉴权证书，实现 EPC 中 HSS 的部分功能。
- AUSF (Authentication Server Function, 鉴权服务功能)：本质上是一个鉴权服务器，实现 EPC 中 HSS 的部分功能。

第二组也是控制面（CP）功能，但在 EPC 中没有直接对应的模块：

- SDSF (Structured Data Storage Network Function, 结构化数据存储网络功能)：用于存储结构化数据的辅助服务，可以通过在微服务系统中部署 SQL 数据库实现。

- UDSF (Unstructured Data Storage Network Function, 非结构化数据存储网络功能)：用于存储非结构化数据的辅助服务，可以通过在微服务系统中部署“键/值存储”来实现。
- NEF (Network Exposure Function, 网络开放功能)：向第三方服务开放指定功能，包括内外部数据的转换，可以在微服务系统中通过“API 服务器”实现。
- NRF (NF Repository Function, 网络存储功能)：用于发现可用服务，可以通过在微服务系统中部署“发现服务”来实现。
- NSSF (Network Slicing Selector Function, 网络切片选择功能)：为服务特定 UE 选择服务的网络切片。切片是 5G 的一个关键特性，本质上是一种划分网络资源的方法，用以给不同的用户提供不同的服务，我们将在后面的章节中深入讨论。

第三组是用户面 (UP) 功能组件：

- UPF (User Plane Function, 用户面功能)：转发 RAN 与互联网之间的流量，对应 EPC 中的 S/PGW 组合。除报文转发外，UPF 还负责策略执行、合法监听、流量使用报告和 QoS 策略。

其中，第一组和第三组可以被看作是对 4G EPC 的直接重构，而第二组是 3GPP 将云原生解决方案作为移动核心网解决方案的路径。需要特别注意的是，引入不同的存储服务意味着所有其他服务都可以是无状态的，可以更容易的支持伸缩。还要注意，图 15 采用了在基于微服务的系统中常见的思想，即显示连接所有组件的**消息总线 (message bus)**，而不是一组组成对的连接，这相当于提供了一个易于理解的建议实现策略。

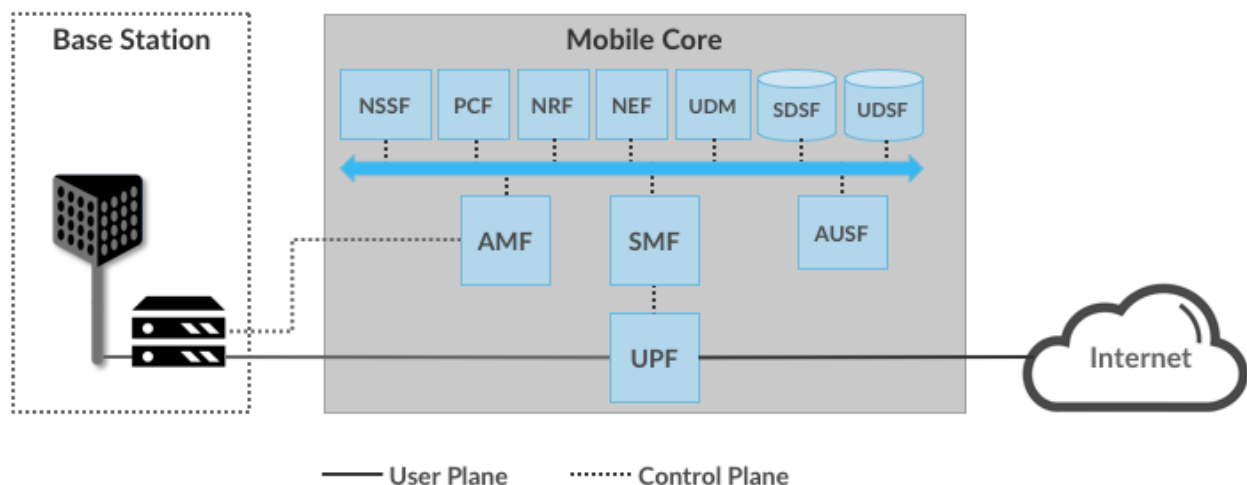


图 15. 5G 移动核心(NG-Core)。

撇开这些细节不谈，需要注意的是，我们可以将移动核心网定义为一组服务，被称为*服务依赖图 (Service Graph)* 或*服务链 (Service Chain)*，后者在面向 NFV 的文档中更为普遍。还有另一个在云原生架构中有特殊含义的类似的专有名词，*服务网格 (Service Mesh)*，我们将避免重用这个术语。3GPP 在特定的专有名词上没有倾向性，因为这被认为是一种实现选择，而不是规范的一部分。我们将在后面的章节中介绍我们的实现选择。

### 3.4. 安全性与移动性 (Security and Mobility)

接下来我们将仔细考虑蜂窝网络的两个独特特性——对安全性和移动性的支持——这两个特性将蜂窝网络与 WiFi 区分了开来。下面提供了关于每个终端如何连接到网络的一些细节。

我们从安全体系架构开始，它基于两个信任假设。首先，每个基站都相信它通过一个安全的私有网络连接到移动核心网，在这个网络上它建立了如图 11 所示的隧道：一个到核心网用户面 (Core-UP) 的 GTP/UDP/IP 隧道和一个到核心网控制面 (Core-CP) 的 SCTP/IP 隧道。其次，每个 UE 都有一个运营商提供的 SIM 卡，它是用户的唯一标识（即电话号码），并确定与该运营商的基站通信所需的无线电参数（如频段）。SIM 卡还包括一个密钥，终端用它来对自己进行认证。

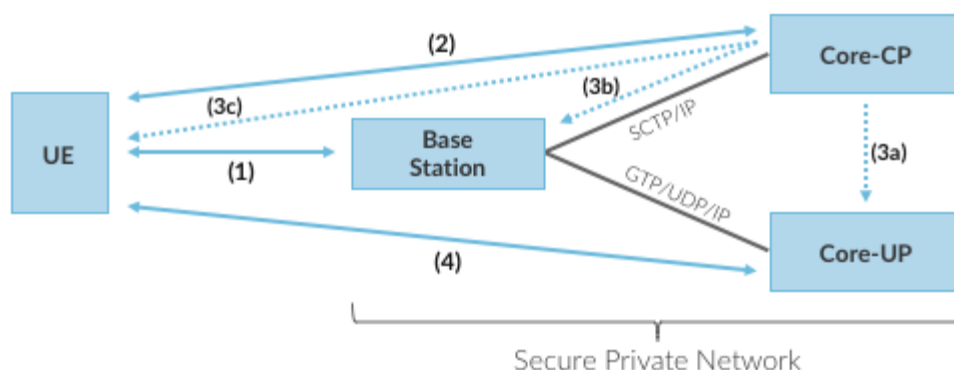


图 16. 建立安全的控制面/用户面通道的步骤。



以此为起点，图 16 显示了每个 UE 的连接步骤。当 UE 刚开机时，它通过临时（未认证的）无线链路与附近的基站通信（步骤 1）。基站通过现有隧道将请求转发给 Core-CP，Core-CP（具体来说，是 4G 中的 MME 和 5G 中的 AMF）根据协议对 UE 发起认证过程（步骤 2）。3GPP 定义了一组用于身份验证和加密的选项，具体使用哪种实际协议是一个实现选择。例如，AES (*Advanced Encryption Standard*, 高级加密标准) 是加密的选项之一。请注意，由于基站到 UE 的链路还不安全，因此这种身份验证交换最初是明文的。

一旦 UE 和 Core-CP 认可了彼此的身份，Core-CP 将会把为该 UE 提供服务需要的参数发送给其他组件（步骤 3）。包括：（a）指示 Core-UP 初始化用户面（例如，为 UE 分配一个 IP 地址并设置适当的 QCI 参数）；（b）指示基站建立通往 UE 的加密通道；（c）给 UE 提供对称密钥，它需要用来与基站建立加密通道。对称密钥使用终端的公钥进行加密（因此只有终端可以使用其秘钥解密）。一旦完成，终端就可以通过 Core-UP 使用端到端用户面通道传输数据（步骤 4）。

关于这个过程有三个额外的细节需要注意。首先，在步骤 2 中建立的 UE 和 Core-CP 之间的安全控制通道仍然可用，并由 Core-CP 用来在会话过程中向 UE 发送额外的控制信令。

第二，在步骤 4 中建立的用户面通道被称为默认承载服务 (*Default Bearer Service*)，还可以在 UE 和 Core-UP 之间建立额外的通道，每个通道都可以有不同的 QCI 值。不同的应用可能会有不同的值，例如，在移动核心网控制下对流量进行 DPI (*Deep Packet Inspection*, 深度包检测)，寻找需要特殊处理的流。

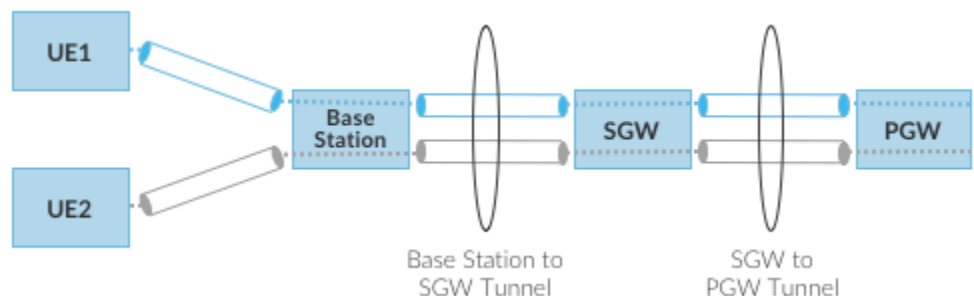


图 17. 端到端用户面通道中涉及的逐跳隧道。

第三，虽然最终的用户面通道在逻辑上是端到端的，但每个通道实际上都是作为一系列逐跳隧道实现的，如图 17 所示（图中为 4G 移动核心网的 SGW 和 PGW）。这意味着对于给定的 UE 来说，端到端路径上的每个组件都会通过一个本地标识符来终止下游隧道，并用第二个本地标识符来启动上游隧道。在实践中，每个流的通道通常被绑定到单个组件间的通道中，这就造成无法区分任何特定的端到端 UE 通道的服务级别。这是 4G 的一个限制，5G 雄心勃勃的想要纠正这个限制。

对移动性的支持可以理解为当 UE 在 RAN 中移动时，重新执行图 16 中所示的一个或多个步骤的过程。由 (1) 表示的未经认证的链路允许 UE 被覆盖范围内的所有基站所发现。（在后面的章节中，我们将这些链接称为*潜在链接*(*potential links*)。）各基站之间直接通信，并根据测量到的信号 CQI 做出切换决策。一旦做出决定，该决定将被发送给移动核心网，重新触发 (3) 所示的设置功能，进而重建如图 17 所示的基站和 SGW 之间（或 5G 中基站和 UPF 之间）的用户面隧道。蜂窝网络最独特的特点之一是，移动核心网的用户面（如 5G 中的 UPF）在切换过渡期间将会缓存数据，以避免丢包和随后的端到端重传。

换句话说，在 UE 移动的时候，蜂窝网络会保持 *UE 会话* (*UE session*)（对应于图 16 的步骤 2 和步骤 4），但只有在移动核心网没有变化的时候才能做到这一点（即只有基站的切换）。这通常是在城市内移动的 UE 的情况，而跨城市的移动（移动核心网需要切换）与 UE 重启没有什么区别。UE 会被分配一个新的 IP 地址，并且不会试图缓存并在随后再次发送传输中的数据。另外，和移动性无关，但与本讨论相关的是，任何在一段时间内处于非活动状态的终端的会话也会丢失，只有当终端再次处于活动状态时，才会建立新的会话并分配新的 IP 地址。

注意，这种基于会话的方法可以追溯到蜂窝网络的源头，即面向连接的网络。一个有趣的思考实验是，移动核心网是否会继续发展，以便更好的匹配运行在其上的，通常会假设为无连接状态的互联网协议。

### 3.5. 部署选项 (Deployment Options)

随着移动网络已经部署了 4G RAN/EPC，在部署新的 5G RAN/NG-Core 的过程中，我们不能忽视从 4G 向 5G 过渡的问题（IP 世界已经为这个问题努力了 20 年）。3GPP 正式发布了多个部署选项，可以总结如下：

- 独立 4G /独立 5G
- 基于 4G EPC 的非独立（4G+5G RAN）部署
- 基于 5G NG-Core 的非独立（4G+5G RAN）部署

三种选项中的第二种，通常被称为“NSA”，涉及在给定的地理区域内，在现有 4G 基站的基础上部署 5G 基站，以提升速率和容量。在 NSA 中，用户设备与 4G 移动核心网之间的控制面流量利用（即通过）4G 基站进行转发，而 5G 基站仅用于承载用户流量。最终，运营商将部署 NG Core，并将 5G 基站连接到 NG Core 以实现独立（SA）运营，从而完成向 5G 的迁移。图 18 展示了 NSA 和 SA 操作。

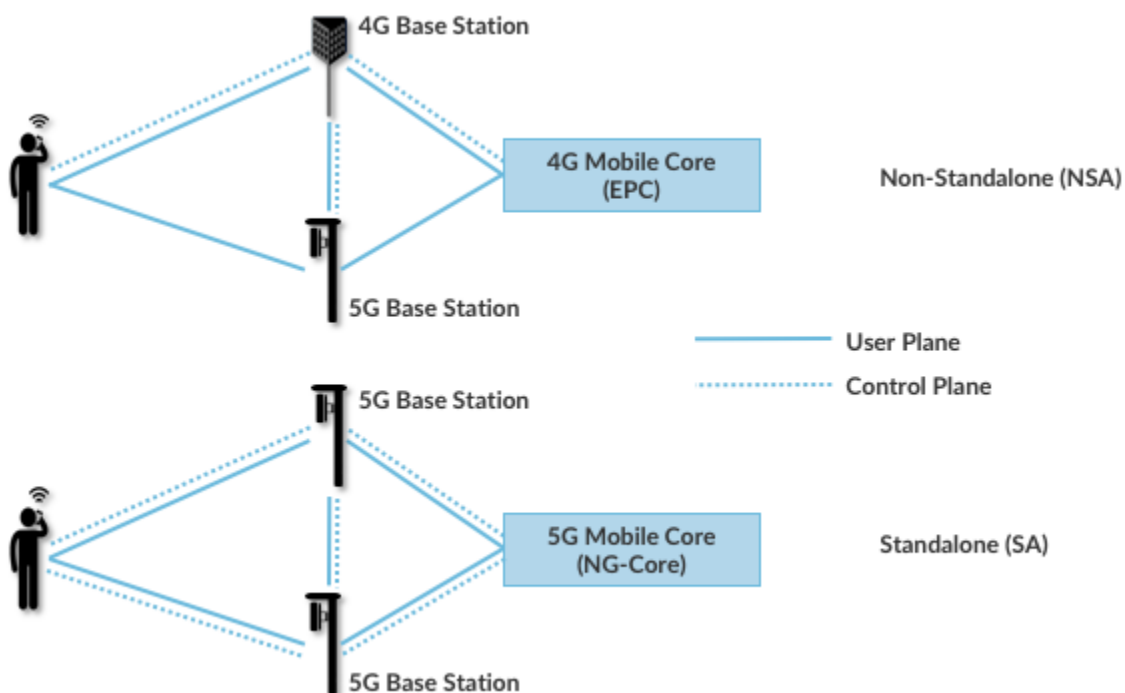


图 18. NSA 和 SA 5G 部署选项。

我们需要注意这个分阶段演进问题的一个原因是，在接下来的章节中我们将面临类似的挑战。为了在下面的讨论中接近实现的细节，我们必须更具体地说明是在使用 4G 组件还是 5G 组件。作为一般规则，我们将使用 4G 移动核心网组件，因为我们有可用的开源

代码。不过我们相信读者可以做出适当的替代，而不丧失其通用性。和其他行业一样，开源社区也在逐步进行将 4G 代码库演进为 5G 兼容版本代码库的工作。

### 延伸阅读

要了解更多关于 4G 到 5G 演进策略的信息，请参阅 GSMA 2018 年 4 月发布的报告：《迈向 5G 之路：介绍和演进》<sup>[2]</sup>。

### Reference:

- [1] <https://www.grandmetric.com/blog/2018/07/14/lte-and-5g-differences-system-complexity/>
- [2] [https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration\\_FINAL.pdf](https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf)

## 4. RAN 详解（RAN Internals）

在上一章（第三章基础架构），我们对 RAN 的介绍主要集中在功能上，基本没有涉及 RAN 的内部架构。现在我们将关注更多的内部细节，介绍 5G 是如何改造 RAN 的。我们首先介绍数据报文处理流水线的几个步骤，然后展示这些步骤是如何被分解、分布和实现的。

在本章中，我们会在前三节中自底向上逐步构建 RAN，然后第四节总结整个设计，重点关注如何构建端到端的系统。

### 4.1. 报文处理流水线（Packet Processing Pipeline）

图 19 展示了 3GPP 标准定义的基站的数据包处理步骤。注意，该图将基站描述为一个流水线（发送给 UE 的包沿着从左到右的步骤进行处理），不过也可以将其视为协议栈（在 3GPP 官方文档中也是这样做的）。还需要注意的是（截止到目前）我们还不知道这些步骤是如何实现的，但由于我们最终将走向基于云的实现，我们可以将每个步骤都视为对应的微服务（也许这样可以有助于理解）。

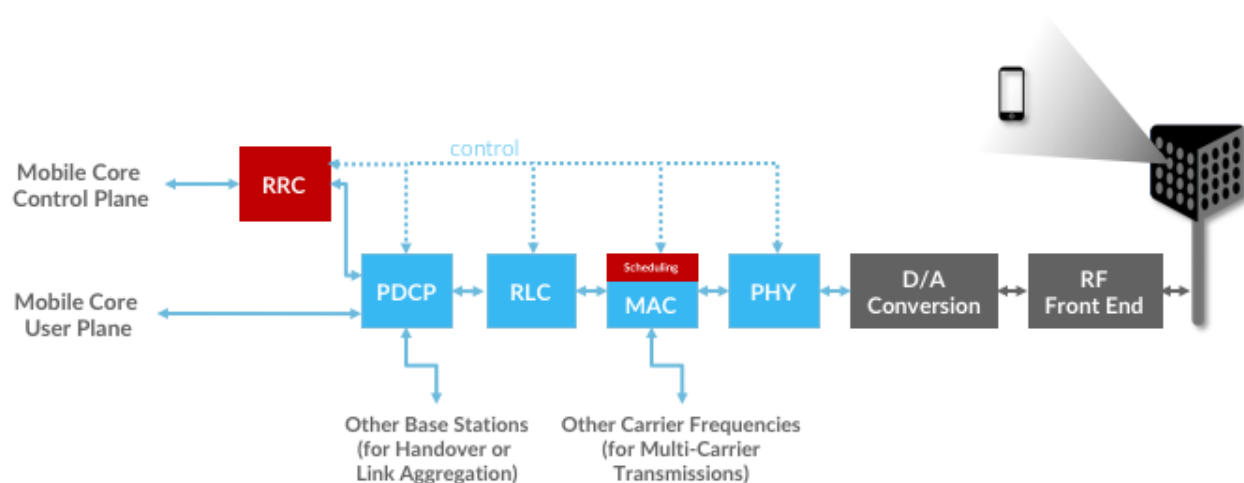


图 19. RAN 处理流水线，包括用户面和控制面组件。

关键步骤如下：

- RRC（Radio Resource Control，无线资源控制）→ 负责配置管道以及相应的策略。RRC 运行在 RAN 的控制面，不处理用户面的报文。
- PDCP（Packet Data Convergence Protocol，分组数据汇聚协议）→ 负责压缩和解压 IP 报头，提供加密和完整性保护，并做出“早期”转发决定（例如，是将包沿管道发送到 UE 还是转发到另一个基站）。

- RLC (Radio Link Control, 无线链路层控制协议) → 负责分片和重组, 基于 ARP (automatic repeat request, 自动重传请求) 实现分片的可靠发射/接收。
- MAC (Media Access Control, 媒体访问控制协议) → 负责缓冲、多路复用和解复用分片, 包括做出什么时间传输什么分片的所有实时调度决策, 以及“延迟”转发决策 (例如, 切换到替代载波频率, 包括 Wi-Fi)。
- PHY (Physical Layer, 物理层) → 负责编码和调制 (在前面章节有所讨论), 包括 FEC。

图 19 中的最后两个步骤 (D/A 转换和射频前端) 超出了本书范围。

虽然可以将图 19 中的各个步骤简单的视为一个纯粹的从左到右的管道, 但实际上是由 MAC 阶段的调度器完成了对于出站流量处理“主循环”的工作, 它负责从上游的 RLC 读取数据并将传输工作调度给下游的 PHY。调度器需要决定在每个时间段 (基于前一章中列出的所有因素) 向给定 UE 传输的字节数, 因此它必须从上游队列请求 (获取) 符合该长度的一段分片。在实践中, 在单个调度间隔内向单个 UE 传输的分片大小可以从几个字节到整个 IP 包大小。

## 4.2. 分布式 RAN (Split RAN)

下一步需要理解上面概述的功能是如何在物理模块之间进行划分的, 从而在集中式和分布式的部署位置之间进行“分割”。历史上, 主要的实现选择是“不分离”, 图 19 中所示的整个管道在单个基站中运行。如今 3GPP 标准已经被扩展, 允许选择在多个不同的位置进行功能分割, 由运营商领导的 O-RAN (Open RAN) 联盟正在积极探索如图 20 所示的分割, 我们在本书的其余部分将采用这种分割模式。

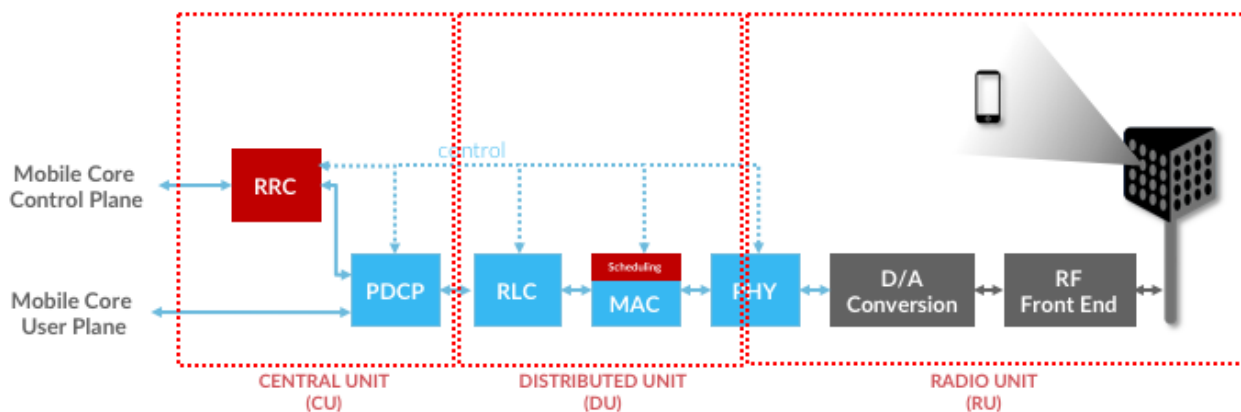


图 20. 分布式 RAN 处理流水线分割为中央单元(CU), 分布式单元(DU)和无线电单元(RU)。

这导致了与图 21 所示类似的 RAN 配置, 其中有一个部署在云上的 CU (Central Unit, 中央单元), 服务于多个 DU (Distributed Unit, 分布式单元), 每个 DU 又服务于多个 RU

(*Radio Unit*, 无线单元)。关键是, RRC (集中在 CU 中) 只负责近实时的配置和控制决策, 而调度器是 MAC 的一部分, 负责所有实时调度决策。

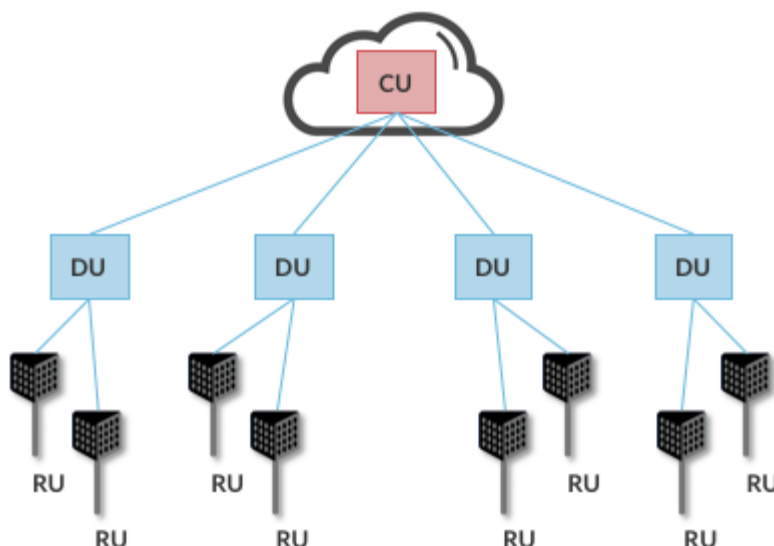


图 21. 分布式 RAN 的层次结构, 一个 CU 服务多个 DU, 每个 DU 服务多个 RU。

因为无线传输的调度决策是由 MAC 层实时做出的, DU 需要尽量“靠近”(时延在 1ms 内)它所管理的 RU (不能基于过时的通道信息做出调度决策)。一种熟悉的配置是将 DU 和 RU 一起部署在铁塔上。但如果 RU 对应的是小基站 (small cell), 在一个中等大小的地理区域 (例如商场、校园或工厂) 内可能会部署很多 RU, 那么一个 DU 就需要服务于多个 RU。mmWave 在 5G 中的使用可能会让后面这种配置变得更加普遍。

还要注意的, 分布式 RAN 改变了回传网络的性质, 在 4G 中, 回传网络将基站 (eNB) 连接回移动核心网。而分布式 RAN 将会出现多个不同的连接, 它们的正式名称是:

- RU-DU 之间的连接被称为前传 (Fronthaul)
- DU-CU 之间的连接被称为中传 (Midhaul)
- CU-移动核心网之间的连接被称为回传 (Backhaul)

关于 CU 还需要注意 (与下一章相关), 人们可能会将 CU 和移动核心网部署在同一个集群中, 这意味着回传是通过集群交换网络实现的。在这样的配置中, 中传起到了之前回传的效果, 而前传则受到 MAC 实时调度器的可预测/低延迟需求的限制。

关于图 20 中表示的 CU 还有一个需要注意的地方, 它包含两个功能块: RRC 和 PDCP, 它们分别位于 RAN 的控制面和用户面。这种分离与第 3 章中介绍的 CUPS 的思想是一致的, 并且随着我们深入了解 RAN 是如何实现的, 它将发挥越来越重要的作用。现在, 我们注意到这两个部分通常分别被称为 CU-C 和 CU-U。

延伸阅读



要了解更多关于分布式 RAN 的组件设计考虑，请参见 NGMN 联盟 2015 年 3 月的报告：《RAN 演进项目：后传和前传的演进（RAN Evolution Project: Backhaul and Fronthaul Evolution）》<sup>[1]</sup>。

### 4.3. 软件定义 RAN（Software-Defined RAN）

我们现在介绍如何根据 SDN 的原则实现 RAN，从而诞生 SD-RAN 的概念。关键的架构洞察如图 22 所示，图 19 中的 RRC 被划分为两个子组件：左边实现了符合 3GPP 规范的和移动核心网控制面通信的接口，而右边则有机会定义一个新的可编程 API，实现对 RAN 用户面管道进行基于软件的控制。

更具体地说，左边的子组件只是在移动核心网和 PDCP 之间转发控制面数据包，通过这条路径，移动核心网可以与 UE 进行通信并执行控制。而右边的子组件则实现了 RRC 的核心控制功能。在 O-RAN 架构文档中，这个组件通常被称为 *RIC*（*RAN Intelligent Controller*，*RAN 智能控制器*），我们在这里也采用这个术语。“近实时（Near-Real Time）”这个限定词表示 RIC 是 CU 中实现 10-100ms 控制循环的一部分，从而有别于 DU 中运行的 MAC 调度器所完成的 1ms 控制循环。

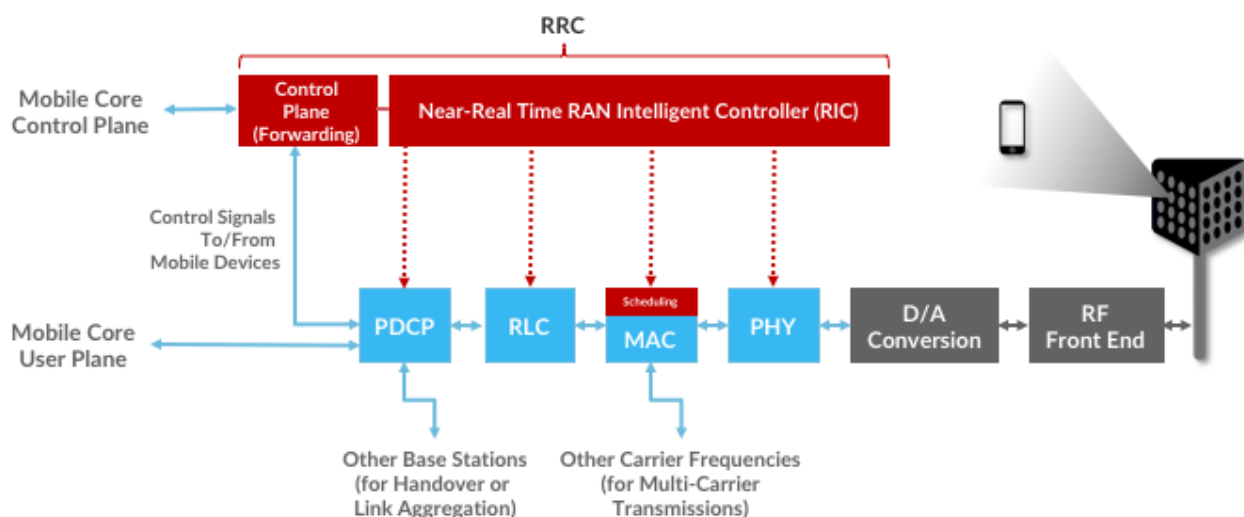


图 22. RRC 解耦为面向核心网的控制面组件和近实时控制器。

尽管没有在图 22 中明确显示，但是 RRC 的所有组成部分，加上 PDCP，就构成了 CU。

图 23 显示了近实时 RIC 的内部细节，实现为加载了一组 SDN 控制应用程序的 SDN 控制器。RIC 维护着 *R-NIB*（*RAN Network Information Base*，*RAN 网络信息库*），这是一组可以被许多控制应用程序使用的通用信息。R-NIB 包括时间平均 CQI 值和每个会话的状态（例如，GTP 隧道 ID，流量 QCI 值），而 MAC（作为 DU 的一部分）维护实时调度器所需的瞬时 CQI 值。具体来说，R-NIB 包括以下状态：



- 节点（NODES）：指基站和移动设备  
 基站属性（Base Station Attributes）：标识符（Identifiers）版本（Version）配置报告（Config Report）RRM 配置（RRM config）PHY 资源使用情况（PHY resource usage）  
 移动设备属性（Mobile Device Attributes）：标识符（Identifiers）能力（Capability）测量配置（Measurement Config）状态（活跃/非活跃）
- 链路（LINKS）：两个节点之间的实际链路，以及 UE 与所有相邻蜂窝（cells）之间的潜在（Potential）链路  
 链路属性（Link Attributes）：标识符（Identifiers）链路类型（Link Type）配置/承载参数（Config/Bearer Parameters）QCI 值
- 切片（SLICES）：虚拟化 RAN 架构  
 切片属性（Slice Attributes）：链路（Links）承载/流（Bearers/Flows）有效期（Validity Period）预期 KPI（Desired KPIs）MAC RRM 配置（MAC RRM Configuration）RRM 控制配置（RRM Control Configuration）

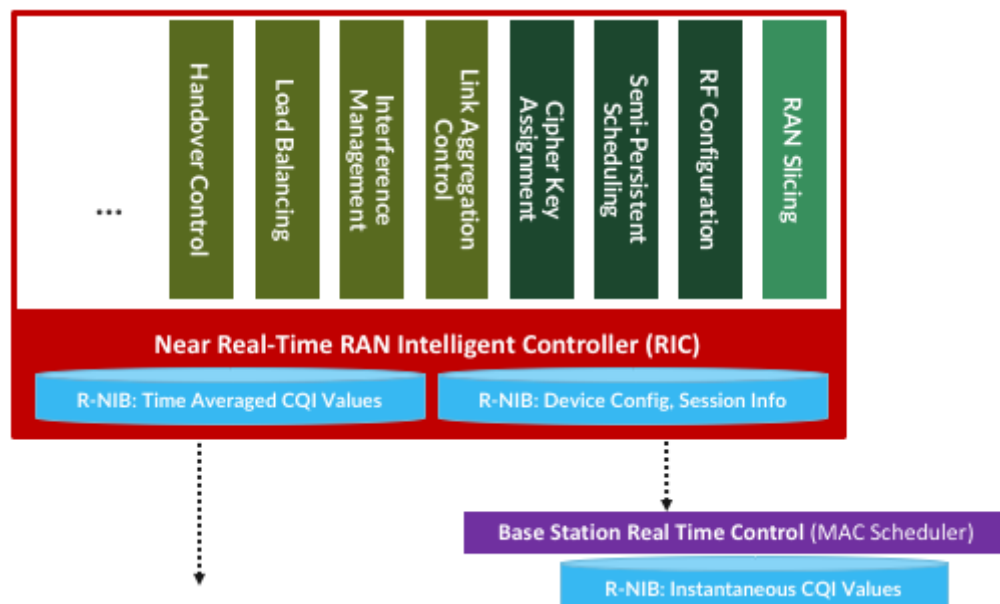


图 23. 近实时 RAN 控制器上运行的控制应用程序示例。

图 23 中所示的控制应用程序示例包含了一系列的可能性，但这并不是一个详尽的列表。其中最被寄予厚望的是最右边的 RAN Slicing，它引入了一个新功能：虚拟化 RAN（Virtualizing the RAN）。这个想法已经被实现了，下一章我们将详细介绍。

接下来的三个应用（RF Configuration、Semi-Persistent Scheduling、Cipher Key Assignment）是面向配置的应用程序的示例。它们提供了一种程序化的方式来管理很少变化的配置状态，从而实现零接触运维。制定有意义的策略（也许是基于分析驱动）很可能是未来创新的途径。

最左边的四个控制应用示例是 SDN 思想的最佳实践，它强调对分布式转发的集中控制。这些功能（Link Aggregation Control、Interference Management、Load Balancing、Handover

r Control) 目前由单个基站实现, 只有局部可见性, 但它们具有全局影响力。SDN 方式是集中收集可用的输入数据, 做出全局最优决策, 然后将各自的控制参数发送给基站执行。这部分工作正在进行中, 但是采用这种方法思想的产品已经出现了。在广域网领域, 多年来有很多使用类似方法优化网络的尝试, 获得了引人注目的效果。

虽然上面将可能的控制应用程序分类为面向配置的以及面向控制的, 但另一个可能的分类方式是基于当前在两个不同层次上控制移动链路的做法。在细粒度级别上, 每个节点和每个链路的控制是使用分布在各个独立基站上的 RRM (Radio Resource Management, 无线资源管理) 功能进行的。RRM 功能包括调度、切换控制、链路和载波聚合控制、承载控制和访问控制。在粗粒度层面, 利用 SON (Self-Organizing Network, 自组织网络) 功能对本区域移动网络进行优化和配置。这些功能监控相邻节点列表、管理负载均衡、优化覆盖和容量、旨在减少网络范围内的干扰、集中配置参数等等。由于存在这两种级别的控制, 在 SD-RAN 的 O-RAN 文档中我们可以看到既有 RRM 应用程序 (RRM Applications) 又有 SON 应用程序 (SON Applications)。

### 延伸阅读

想要了解 SDN 原则如何成功应用于生产网络, 我们推荐阅读 2013 年 8 月发布于 ACM SIGCOMM 的论文: 《B4: 全球部署软件定义广域网的经验 (B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN)》<sup>[2]</sup>。

## 4.4. 架构演进 (Architect to Evolve)

和前面三节一样, 我们将在最后通过再次分析 RAN 的解耦所涉及的步骤来结束对 RAN 内部的讨论。解耦涉及到多个不同的层次, 在这个过程中, 我们需要解决几个问题, 包括定义新的开放接口, 这些接口定义了围绕 5G RAN 架构演进的核心要素。

在解耦的第一层中, 3GPP 标准定义了如何对 RAN 进行水平分割的若干种选项。水平分割将图 19 所示的 RAN 处理流水线分解为独立运行的组件。图 24(a)展示了将单个 RAN 水平分解为三个不同的组件: CU、DU 和 RU。O-RAN 联盟从 3GPP 中选择了特定的解耦选项, 并正在开发这些组件之间的开放接口。3GPP 定义了 RAN 与移动核心网之间的 N2 和 N3 接口。

第二层是垂直分割, 关注 CU 的控制/用户面分离 (CUPS), 形成 CU-C 和 CU-U, 如图 24(b)所示。其中控制面为 3GPP 控制平面, CU-U 负责维护服务于用户流量的管道, CU-C 专注于处理移动核心网和 RAN 组件 (以及 UE) 之间的控制消息信令。图 24(b)还展示了 O-RAN 定义的组件之间的接口。

第三层遵循 SDN 范式, 并进一步推进了垂直分割。通过将 RAN 的大多数控制功能 (RRM 功能) 从 RAN 组件中分离出来, 并在逻辑上将它们集中部署为运行在 SDN 控制器上的应用程序, 对应于图 22 和 23 中显示的近实时 RIC。图 24(c)再次展示了这种基于 SDN 的垂直分解, 并且展示了对应的 O-RAN 接口。

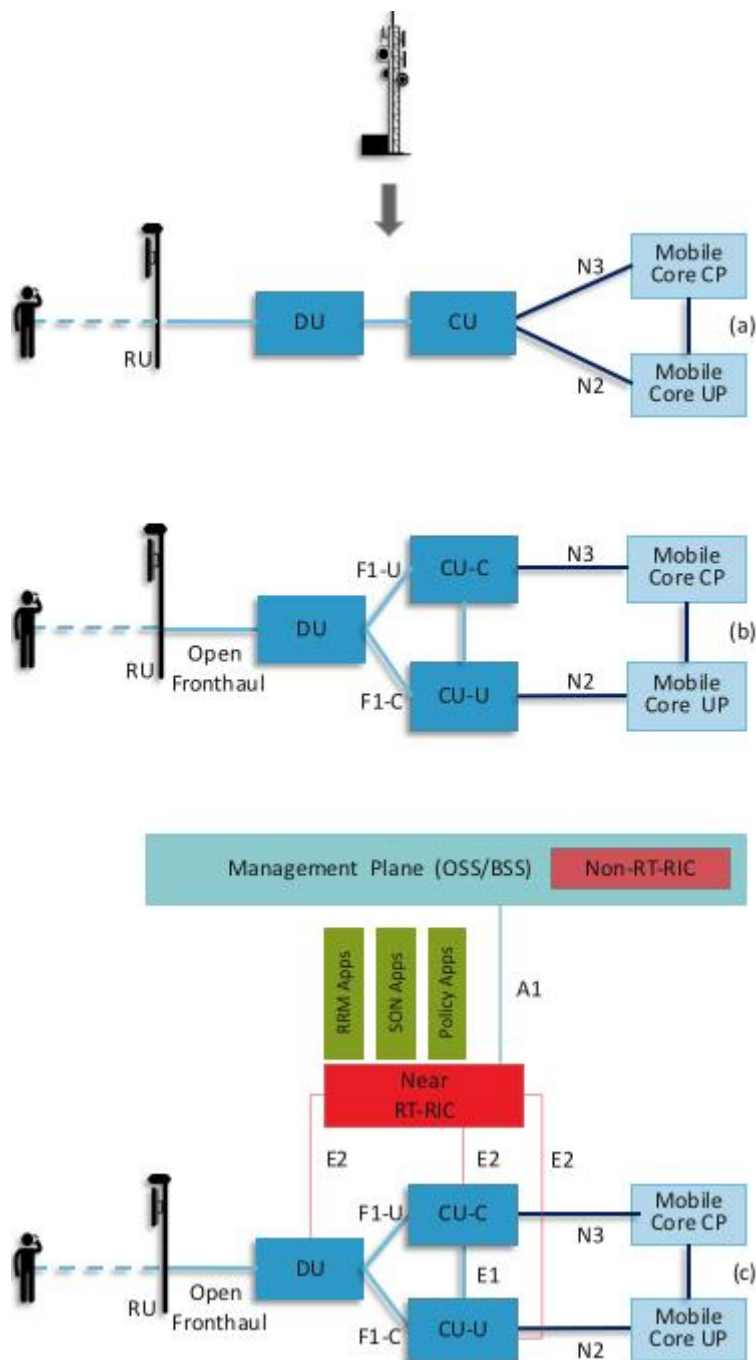


图 24. RAN 三层解耦：(a)水平，(b)垂直 CUPS，(c)垂直 SDN。

接口名称看上去很神秘，不过知道它们的细节对我们理解 RAN 的概念来说并没有什么帮助，只会让我们越发理解将 SDN 这样的技术变革引入到这样一个需要努力实现完全的向后兼容和具备通用互操作性的环境中的挑战。话虽如此，我们还是举两个值得关注的例子。

一个是 A1 接口，移动运营商的管理平面（在电信领域中通常称为 *OSS/BSS(Operations Support System, 运营支持系统/Business Support System, 业务支持系统)*）用它来配置 RAN。到目前为止，我们还没有讨论过电信 OSS/BSS，但可以肯定的是，这样的组件应该位于任何电信软件协议栈的顶部，是操作网络所需的所有配置设置和业务逻辑的源头。注意，如图 24(c)所示的管理平面包括一个 *非实时 RIC (Non-Real-Time RIC)* 功能模块，协助位于 A1 接口下面的近实时 RIC。我们过会儿再介绍这两个 RIC 的关系。

第二个是 E2 接口，近实时 RIC 通过它来控制底层的 RAN 组件。E2 接口的一个需求是要能够将近实时 RIC 对接到不同类型的 RAN 组件。类型基于 *服务模型 (Service Model)* 进行抽象，反映在 API 中。其思想是，每个 RAN 组件发布一个服务模型，该模型有效定义了组件能够支持的 RAN 功能集。然后 RIC 对这个服务模型发出以下四种操作的组合：

- **报告 (Report)**：RIC 要求组件报告一个特定功能的值设置。
- **插入 (Insert)**：RIC 指示组件激活用户面功能。
- **控制 (Control)**：RIC 指示组件激活控制面功能。
- **策略 (Policy)**：RIC 在激活的功能上设置策略参数。

当然，通过其发布的服务模型，RAN 组件定义了可激活的相关功能集、可报告的变量和可设置的策略。

总之，A1 和 E2 接口完成了 RAN 的三个主要控制回路中的两个：以非实时 RIC 为控制点的外部（非实时）回路，以近实时 RIC 为控制点的中间（近实时）回路。第三个（内部）控制回路（没有在图 24 中显示）在 DU 内部运行：包括嵌入在 RAN 处理流水线 MAC 层中的实时调度程序。两个外部控制回路的时间边界分别为  $\gg 1\text{sec}$  和  $>10\text{ms}$ ，正如我们在第二章中看到的，实时控制回路时间边界为  $<1\text{ms}$ 。

这就产生了一个问题：具体的功能是如何在非实时 RIC、近实时 RIC 和 DU 之间分布的？我们先看一下后边两个（即两个内部回路）。我们需要认识到并非所有 RRM 功能都可以集中处理，在完成了水平/垂直 CUPS 解耦后，RRM 功能被划分为 CU-C 和 DU。因此，基于 SDN 的垂直分割主要是将 CU-C 测的 RRM 功能集成到近实时 RIC 中。除了 RRM 之外，SON 也将被集成到近实时 RIC。

然后我们再看外部控制回路，近实时 RIC 开启了引入基于策略的 RAN 控制的可能性，通过这种方式，如果发生了运维工程师定义的策略无法处理的情况，则表明需要引入外部控制回路。例如，我们可以开发基于学习的控件，这些控件的推理引擎将作为近实时 RIC 上的应用程序运行，而它们的非实时学习引擎则运行在其他地方。然后，非实时 RIC 与近实时 RIC 交互，通过 A1 接口从管理平面向近实时 RIC 推送相关操作策略。

最后，你可能想知道，既然 3GPP 已经是负责全球蜂窝网络互操作性的标准化机构，为什么还要有 O-RAN 联盟。答案是，随着时间的推移，3GPP 已经成为一个供应商主导的组织，而 O-RAN 是最近由网络运营商创建的（AT&T 和中国移动是创始成员）。O-RAN 的目标是促成一种基于软件的实现，打破目前主导市场的厂商锁定。特别是 E2 接口，它是围绕支持不同服务模型的思想构建的，是该策略的核心。运营商能否成功实现最终目标还有待观察。

**Reference:**

- [1] [https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN\\_RANEV\\_D4\\_BH\\_FH\\_Evolution\\_V1.01.pdf](https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_RANEV_D4_BH_FH_Evolution_V1.01.pdf)
- [2] <https://cseweb.ucsd.edu/~vahdat/papers/b4-sigcomm13.pdf>

## 5. 高级功能 (Advanced Capabilities)

本章将探讨三个例子，尝试解释为什么需要解耦蜂窝网络，有什么好处。在第三章（体系架构）中，我们介绍了“what is”（基于 3GPP 的基础知识），在第四章（RAN 内部详解）中，我们介绍了“what will be”（行业正在演进的方向），而这一章我们将介绍“what might be”（未来最终会达到的可能性）。

### 5.1. 数据面优化 (Optimized Data Plane)

对功能进行拆分的原因有很多，其中最引人注目的原因之一是解耦控制和数据代码路径，从而允许对它们分别进行优化。例如，数据路径可以通过将其编程到专门的硬件中来优化。具有可编程分组转发管道的现代白盒交换机是我们可以为蜂窝网络开发的专门硬件的一个完美例子。图 25 显示了拆分的第一步，包含了到目前为止我们所介绍的所有元素。

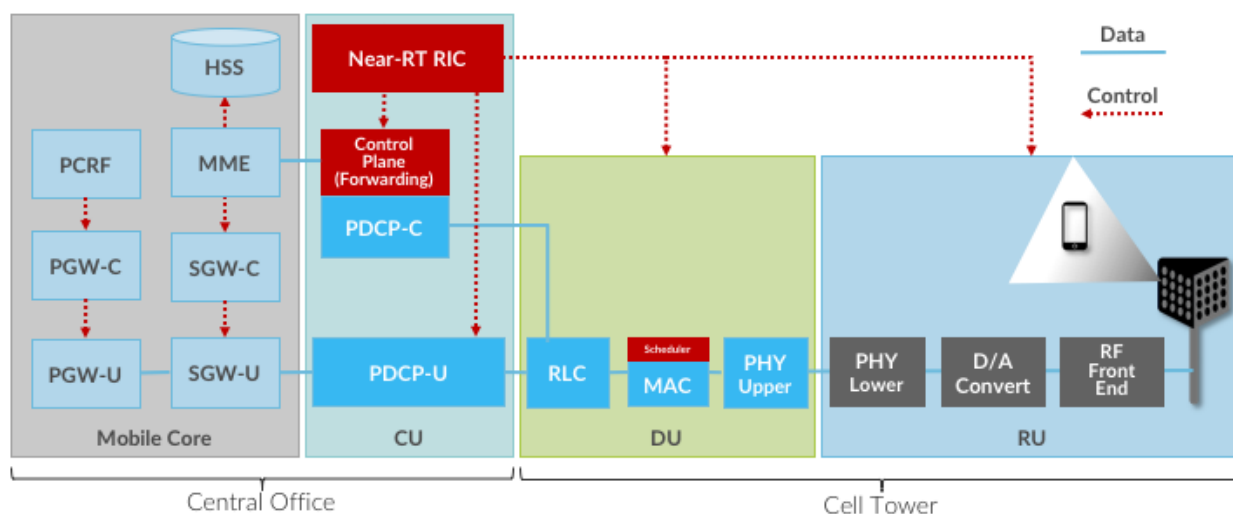


图 25. 端到端解耦系统，包括移动核心网和分布式 RAN。

关于这个图表有几点需要注意。首先，该图结合了移动核心网和 RAN 组件，并根据主要的子系统进行组织：移动核心网、中央单元（CU）、分布式单元（DU）和无线电单元

(RU)。该图还显示了这些子系统到物理位置的一种可能的映射，前两个子系统共同位于一个机房，后两个共同位于一个铁塔，当然也可以部署为其他模式。

其次，图中显示了移动核心网的两个用户面组件 (PGW, SGW)，CU 的用户面组件 (PDCP) 也被进一步分解为一对控制/用户平面，分别表示为 PGW-C/PGW-U、SGW-C/SGW-U 和 PDCP-C/PDCP-U。确切地说，如何实现解耦是一个实现选择问题 (3GPP 并没有做出指定)，但其思想是将用户面组件减少到可以接收/处理/发送数据包的最小内核，并将所有与控制相关的功能都提升到控制面组件中。

第三，在 DU 和 RU 之间分割 RAN 处理流水线中的 PHY (物理层) 组件，PHY 的细节不在本书范围之内。3GPP 规范定义了 PHY 层元素作为一组功能的集合，其中一些可以以软件的方式有效的运行在通用处理器上，而另一些最好基于专用硬件实现 (比如基于 DSP 实现)。这两个块功能分别映射为 PHY Upper (DU 的一部分) 和 PHY Lower (RU 的一部分)。

第四，让人困惑的是，在图 25 中，PDCP-C 和 Control Plane (Forwarding) 组成了一个单一的功能块，与 RLC 和 MME 相连。如何实现这对功能是一个实现选择 (例如，可以映射为两个或多个微服务)，但最终的结果是，它们是端到端路径的一部分，通过这个路径，MME 可以向 UE 发送控制报文。注意，这意味着在控制面和用户面之间解码数据包的责任落到了 RLC 身上。

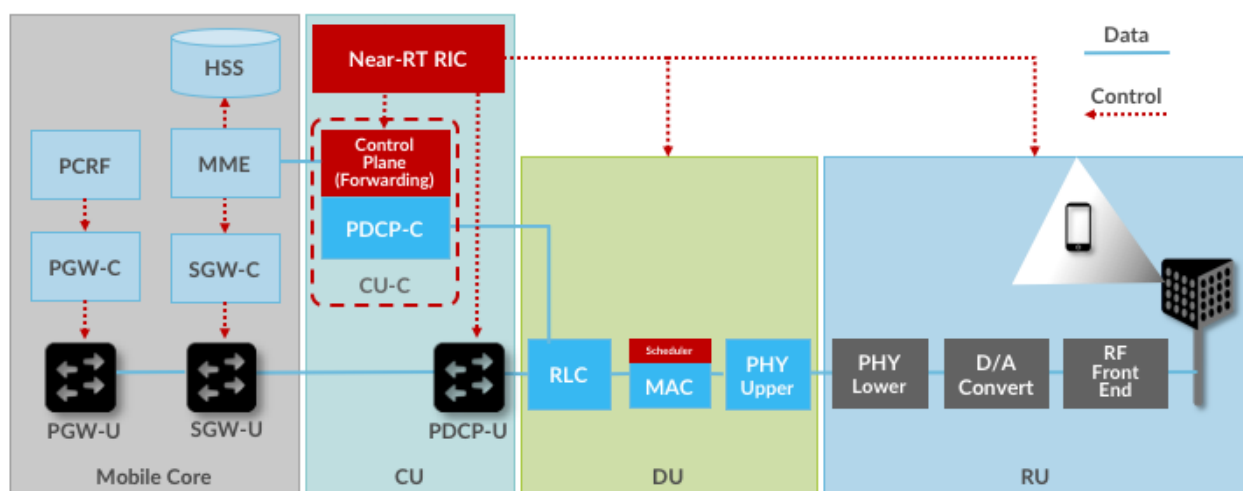


图 26. 在可编程交换机中实现用户面组件。



图 26 展示了我们解耦这些组件的原因：这样我们就可以在交换硬件中实现用户面组件（PGW-U、SGW-U、PDCP-U）。可以使用面向可编程网络报文转发流水线定制的语言（例如 P4）和独立于协议的交换架构（例如英特尔的 Tofino）的组合来实现。目前一个重要的结论是，RAN 和移动核心网用户面可以直接映射到 SDN 支持的数据面。

### 延伸阅读

有关 P4 和可编程交换芯片的更多信息，我们推荐阅读《软件定义网络：系统方法(Software-Defined Networking: A Systems Approach)》中的白盒交换机章节<sup>[1]</sup>。

由于某些术语的冲突，在交换硬件中实现 RAN 和移动核心网的转发功能可能会让人感到困惑。5G 将功能分成控制面和用户面，而 SDN 将功能分成控制面和数据面。重叠的部分来自于我们将 5G 用户面的实现分为基于 SDN 的控制和数据平面。作为一种简化，我们将 Control Plane (Forwarding) 和 PDCP-C 组合起来，称为 CU-C (Central Unit - Control)。

最后，SDN 定义的控制/数据平面分离附带了一个隐含的实现策略，即使用可伸缩和高可用的 NOS (Network Operating System, 网络操作系统。跟传统操作系统一样，NOS 位于应用程序（控制程序）和底层硬件设备（白盒交换机）之间，为这些应用程序提供更高层次的抽象（例如，网络拓扑），同时隐藏底层硬件的实现细节。为了使讨论更加具体，我们以 ONOS (Open Network Operating System, 开放网络操作系统) 为例，其中 PGW-C、SGW-C 和 PDCP-C 都实现为运行在 ONOS 之上的控制应用程序。

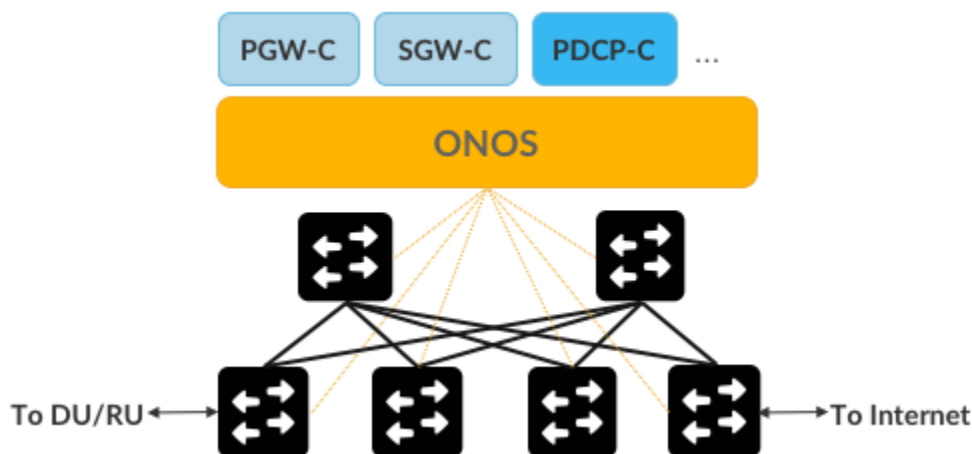


图 27. 控制面组件实现为运行在 SDN 控制器(例如，ONOS)上的控制应用程序。



图 27 展示了一种可能的配置，其中底层交换机以叶脊（leaf-spine）网络架构相互连接。请记住，图 26 所示的交换机线性拓扑只是逻辑上的，并不能将实际的硬件配置为相同的拓扑。我们使用叶脊网络的原因与构建边缘云的最终目标有关，叶脊是这种基于云的集群的原型架构。三个控制应用程序必须协同工作，基于网络实现端到端路径，这实际上是在其他能够感知网络的控制应用程序的帮助下实现的（图中以“...”表示）。我们将在下一章中介绍更多细节，但目前最重要的是，5G 上层控制面组件可以实现为基于 SDN 的控制应用程序。

## 5.2. 多云部署（Multi-Cloud）

功能解耦的另一个结果是，不同的功能可以部署在不同的物理位置上。当我们拆分 RAN 时，已经看到了这一点，可以将一些功能（如 PCDP 和 RRC）放在 CU，而将其他功能（如 RLC 和 MAC）放在 DU。这样我们就可以在机房条件、电力供应、制冷条件都不太好的偏远地区使用更简单（更便宜）的硬件。

我们可以在多个不同的云上重复部署不同组件的过程，从而受益于已经具备了弹性和规模效益的大型数据中心。图 28 展示了移动核心网的多云部署。我们将用户面部署在网络边缘（例如，在网络机房），将控制面部署到中央云上，甚至可以是像谷歌或亚马逊这样的公有云。不仅可以部署 MME、PCRF 和 HSS，还可以部署我们在前一节中解耦出来的 PGW-C 和 SGW-C（注意，图 28 将之前图表中的 PDCP-U 重命名为 CU-U，两个术语表示的是一个意思）。

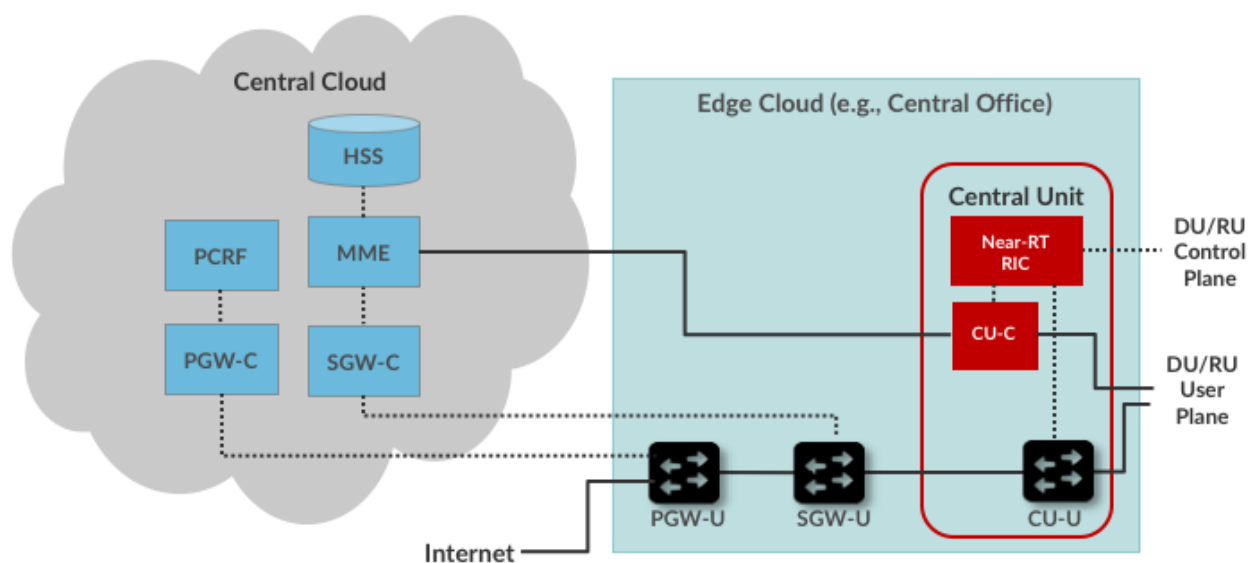


图 28. 多云部署，PGW/SGW 的控制组件和 MME、HSS、PCRF 部署在中央云中运行。

这么做有什么价值？和 DU/RU 一样，边缘云（Edge Cloud）的资源也很有限。如果我们想要在那里腾出空间来运行新的边缘服务，那么将任何没有必要部署在本地的组件转移到资源更丰富、更大的设施中是有帮助的。如果信息分布在多个位置，就很难收集分析，因此集中化部署还有助于跨多个边缘位置收集和分析数据（对数据执行分析也可以受益于丰富的可用计算资源）。

另一个值得关注的原因是，它降低了任何人（不仅仅是拥有和运营 RAN 基础设施的公司）向客户提供移动服务的门槛。这些实体被称为 MVNOs（Mobile Virtual Network Operators，移动虚拟网络运营商），运营 MVNO 的一个简单方法就是在你选择的云中运行你自己的移动核心网。

但是，最大的动机是将移动核心网的用户面组件部署在网络边缘，从而可以分流（break out）本地流量，而不必经过中心节点转发，这有可能极大的减少边缘托管服务的网络延时。我们将在第 7 章回到这个话题。

### 5.3. 网络切片（Network Slicing）

5G 最引人注目的价值主张之一是为不同应用和客户提供不同水平服务的能力。当然，差异化是向某些用户收取更高费用的关键，但收费只是这个故事的一部分，它还必须支持广

泛的具有不同需求的应用程序。例如，流媒体视频需要高的带宽，但可以容忍更大的延迟，而物联网的带宽需求很小，但有时需要极低和可预测的延迟，并需要连接大量可伸缩 (*massively scalable*) 的设备。

支持这种差异化的机制被称为网络切片，其核心可以归结为调度，包括 RAN（决定传输哪个分片）的调度，以及移动核心网（缩放微服务实例并将这些实例放置在可用的服务器上）的调度。下面从 RAN 开始介绍基本思想。

但在深入讨论细节之前，我们注意到网络切片是前面讨论的 QCI（QoS Class Index，QoS 类标识符）的实现。3GPP 定义了一组标准的网络片，称为 *SST (Standardized Slice Type, 标准切片类型)*。例如，SST 1 对应移动宽带，SST 2 对应超可靠低时延通信，SST 3 对应海量物联网，等等。还可以用额外的切片行为扩展这个标准集，或者为每个 SST 定义多个切片（例如，根据优先级进一步区分客户）。

当然，定义所需的切片集和实现切片机制是完全不同的两码事。下面简单介绍一下如何实现切片。

## *RAN 切片 (RAN Slicing)*

我们首先回顾一下第 2 章中提到的基本调度问题。如图 29 所示，可以将无线电频谱抽象为一个二维 RB（Resource Blocks，资源块）网格，调度程序的工作是根据来自终端的 CQI 反馈，决定如何把用每个用户传输队列中的可用分片填充到网格中。重申一下，OFDMA 的强大之处在于它在如何执行映射方面非常灵活。

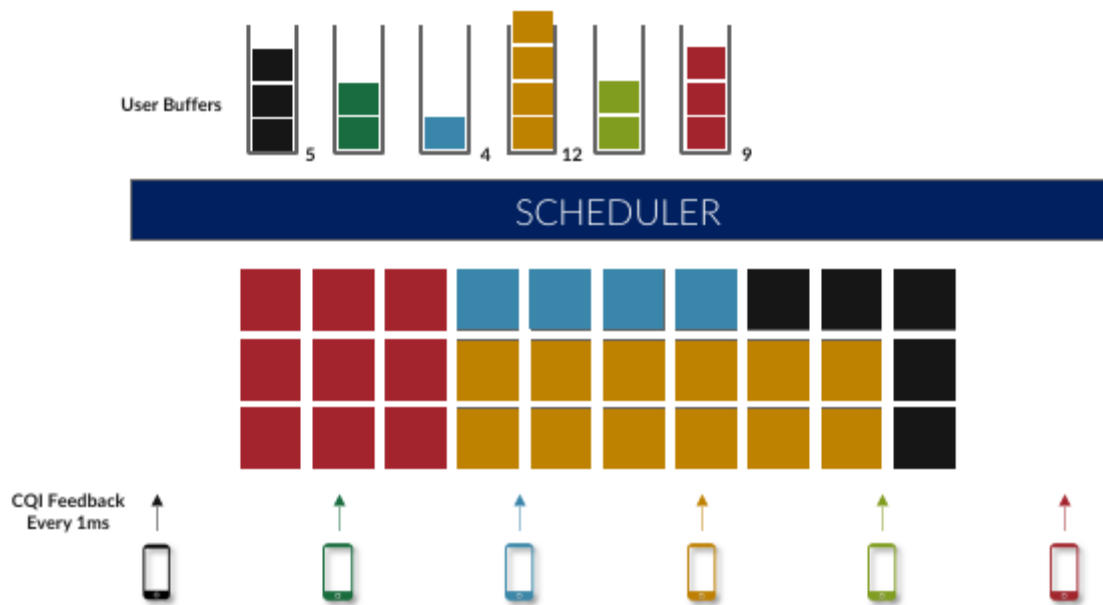


图 29. 调度器为 UE 分配资源块。

虽然理论上我们可以定义一个 uber scheduler（指的是集合了多个参数并可以通过配置开关或切换的调度器）把几十个不同的因素都集成进来，但网络切片的关键是添加一个如图 30 所示的中间层，实现虚拟 RB（Virtual RBs）到物理 RB（Physical RBs）的映射。这种虚拟化策略在计算系统的资源分配器中很常见，可以将分配给每个用户的资源数量与实际分配的物理资源分开。这种虚拟到物理的映射是由一个通常被称为 Hypervisor 的层执行的，而它完全不知道每个转换会影响到哪个用户分片。

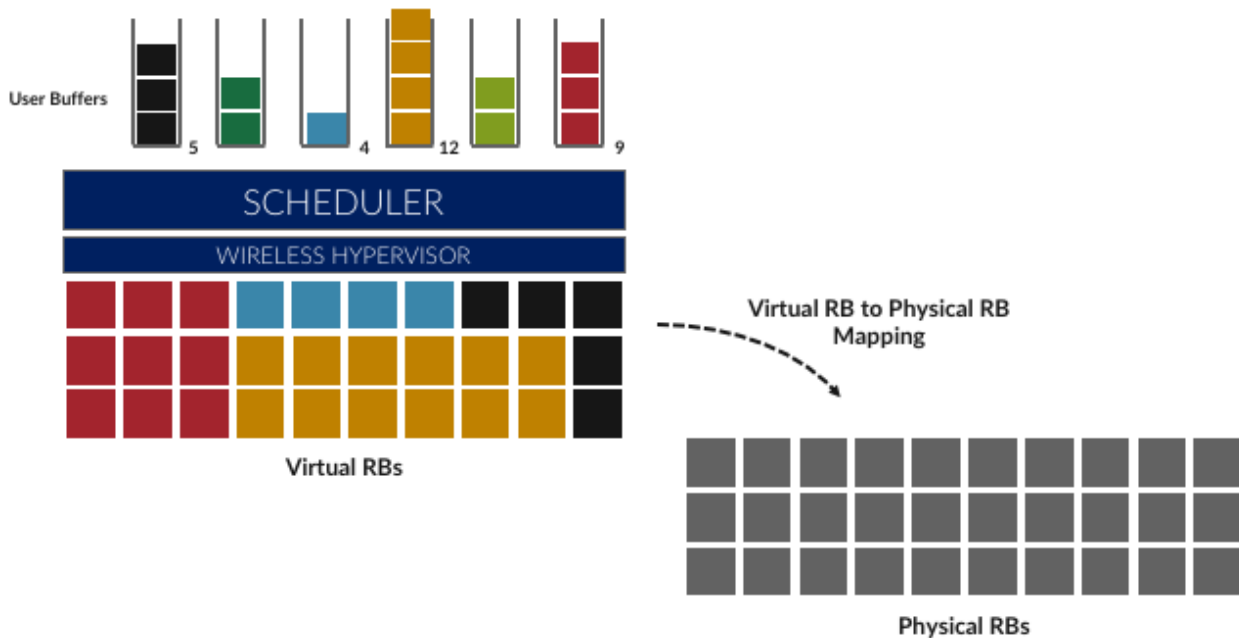


图 30. 无线 Hypervisor 将虚拟资源块映射到物理资源块。

将虚拟 RB 与物理 RB 解耦后，可以定义多个大小不同的虚拟 RB 集，每个都有自己的调度器，图 31 给出了两个相同大小 RB 集的示例。将物理 RB 划分为两个相等分区后，与每个分区相关联的调度器就可以自由分配完全独立的虚拟 RB 了。例如，一个调度器可能被设计用于处理高带宽的视频流量，而另一个调度器可能被优化用于低延迟的物联网流量。或者，可用容量的一部分可以预留给高级客户或其他高优先级流量（例如公共安全），其余部分由其他人共享。

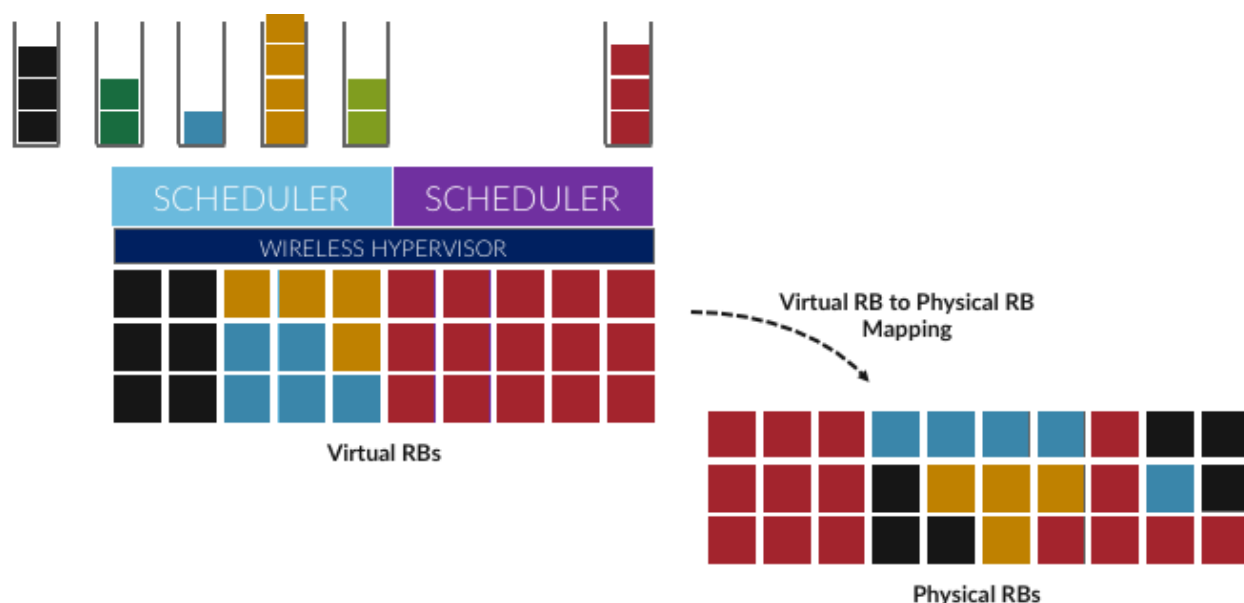


图 31. 在无线 hypervisor 上运行多个调度程序。

再深入一层实现细节，如图 32 所示，DU 中的实时调度器从 CU 中的近实时调度器接收高级指令，DU 按照这些指令基于每个切片 (*on a per-slice basis*) 做出调度决策。单个 RAN 的切片控制程序通过在一组切片之间分配资源来负责宏观调度决策。理解这个实现细节是很重要的，因为所有这些控制决策都是由软件模块实现的，因此很容易更改或定制。在 5G 中这些控制模块并没有被“锁定”在底层系统中，而在 4G 中是被预置在 eNodeB 中的，很难被修改。

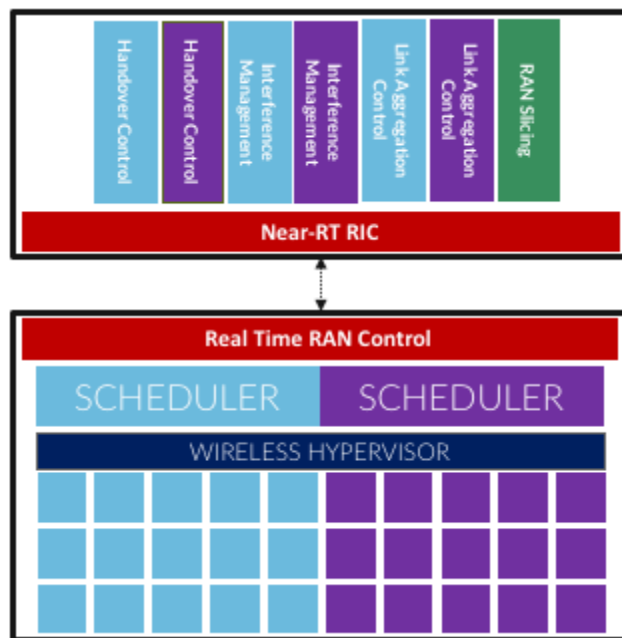


图 32. 与分布式实时 RAN 调度器协作的集中式近实时控制应用程序。

总而言之，RAN 切片的目标是通过可编程的方式创建虚拟 RAN 节点（基站），这些节点在相同的硬件上操作，并根据不同应用程序、服务、用户等的给定策略共享频谱资源。将 RAN 切片与解耦联系起来，考虑到切片之间所需的隔离级别，可以想象到有几种可能的配置。图 33 给出了四个例子，所有例子都假设切片共享天线和射频组件（RU）：

(a) RAN 切片共享 RU、DU、CU-U 和 CU-C； (b) RAN 切片共享 RU 和 DU，但有自己的 CU-U 和 CU-C； (c) RAN 切片共享 RU、CU-U 和 CU-C，但有自己的 DU；和 (d) RAN 切片共享 RU，但有自己的 DU、CU-U 和 CU-C。

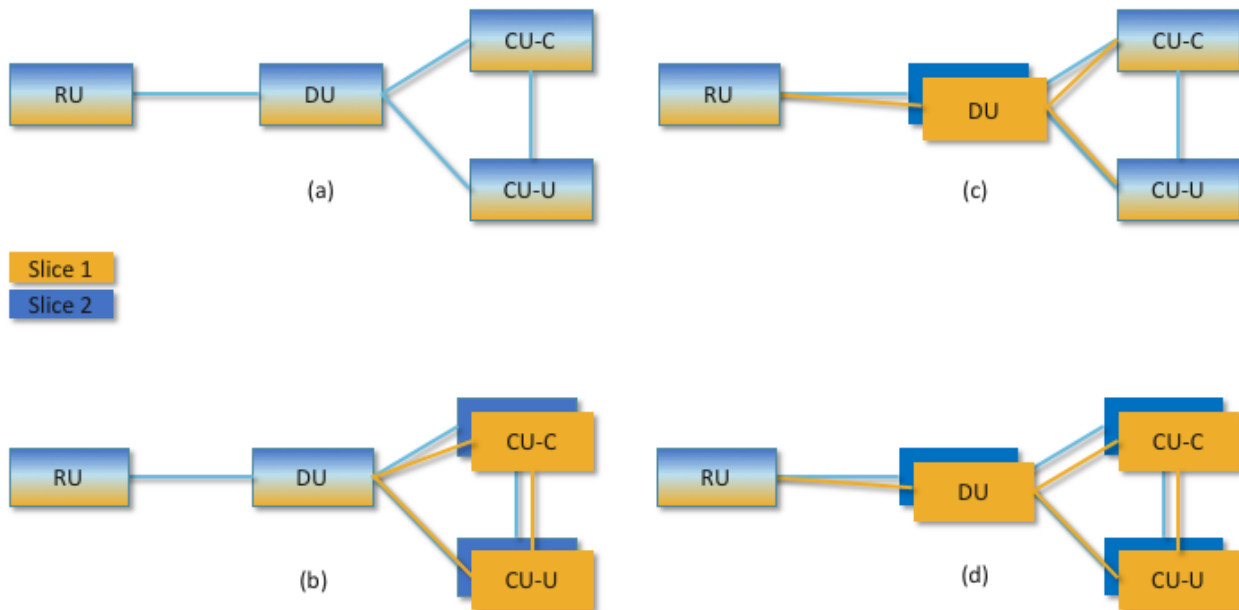


图 33. 支持切片的分布式 RAN 的四种可能配置。

## 核心网切片 (Core Slicing)

除了对 RAN 进行切片，我们还需要对移动核心网进行切片。这也很容易理解，网络交换机中的 QoS 机制（确保每个切片能够获得承诺的带宽）和集群处理器（确保每个微服务的容器被分配了足够的 CPU 以保证相应切片的包转发速率）也需要满足切片的要求。

但是包调度和 CPU 调度都是底层机制，要满足切片的需求，也需要虚拟化和部署移动核心网服务的多个副本。如果将一个切片视为一个系统抽象，那么该抽象需要跟踪实现每个切片的互连微服务集合，然后指示底层包调度器为切片的数据流分配足够的网络带宽，并指示底层 CPU 调度器为切片的容器分配足够的计算周期。

例如，如果有两个网络切片（和图 31、图 32 所示的两个调度器类似），那么就需要有两个移动核心网服务组，两组 AMF，SMF，UPF 等组成的微服务集合，分别处理两个切片。这两个服务组可以独立伸缩（即包含不同数量的容器实例），由它们各自的工作负载和 QoS 保证决定。这两个切片也可以各自做出不同的实现选择，例如，一个针对大规模物联网应用进行优化，另一个针对高带宽 AR/VR 应用进行优化。

我们还需要一个能够将给定的数据流（例如 UE 和某些互联网应用之间的数据）映射到合适的服务实例上的解复用功能。这是在第 3 章中描述的 NSSF 的工作：它负责选择为给定切片的流量提供服务的实例。

切片和备受争议的网络 QoS 之间的相似之处可能会让人得出以下结论：切片不会成功，因为 QoS 似乎从未在大型网络中提供足够的好处，而只是引入了复杂性。但是当带宽不足时，QoS 就能够提供价值，而在最后一英里链路中就有可能存在这样的情况。切片允许对蜂窝网络频谱这一相对稀缺的资源进行有效的分割，因此可能是有价值的。

最后，请注意，切片可以被视为在蜂窝网络上启用虚拟网络（overlay）的一种方式。互联网很早之前就开始通过使用 overlay 来支持创新，比如多播和内容交付网络就是以这种方式发展起来的。因此，虽然我们可能不知道切片将如何被使用，但它是促进创新的一个重要因素。

#### **Reference:**

[1] <https://sdn.systemsapproach.org/switch.html>



## 6. 参考实现 (Exemplar Implementation)

我们在前几章中介绍了移动网络的虚拟化、解耦、优化、分布式和切片，不仅有助于我们理解 5G 的内部工作，而且对于在实践中简化 5G 移动网络的实现工作也是很有必要的。我们的目标是做出具体的工程选择，从而完成一个参考实现。这只是一个范例，不是唯一的可能性。

我们描述的系统被称为 CORD，如果你还记得，我们在引言中介绍过这是 **C**entral **O**ffice **R**e-architected as a **D**atacenter 的首字母缩写。具体来说，CORD 是一份基于商用硬件和开源软件组件构建 5G 系统的蓝图。我们称这种硬件/软件组合为 CORD POD，其想法是在蜂窝网络的每个边缘站点部署一个 POD。下面从一组工程决策的角度来描述 CORD。它不能代替安装、开发和操作 CORD 的详细文档。还要记住，尽管 CORD 在其名称中包含“Central Office”，但 CORD POD 是一种通用设计，并不严格局限于部署在传统的 Central Office 中。

### 延伸阅读

要了解如何安装、操作 CORD 开源软件平台，并对其做出贡献，请参阅 CORD 指南<sup>[1]</sup>。

在讨论细节之前，重要的是要了解，CORD 是一个正在进行中的工作，有一个相当大的开源社区为它的代码库做出贡献。其中许多组件相当成熟，目前正在进行运营商测试并在生产网络中运行。其他的（主要对应于上一章中描述的高级功能）是在“演示模式”中运行的原型，还不够完整，不足以包含在正式发布版本中。此外，正如前面关于部署选项的讨论中所概述的，CORD 从一个产品质量的 EPC 开始实现，并正在逐步向 5G 演进（本章使用特定于 EPC 的组件进行说明）。

### 6.1. 框架 (Framework)

图 34 给出了 CORD POD 的示意图。它的下游连接到一组 DU（以及相关的 RU），并将上游连接到互联网的其余部分。在内部，它包括一组商用服务器（图中显示了四个机架，每个机架有三个服务器，但设计上可以支持从部分机架到 16 个机架的任何部署）和一组白盒交换机，这些交换机以叶脊网络拓扑结构排列（图中显示了两个叶脊交换机，但设计上既能够支持单一的交换机或者每机架两个叶交换机，也能够支持多个脊交换机，只要能够提供足够的东西向带宽）。

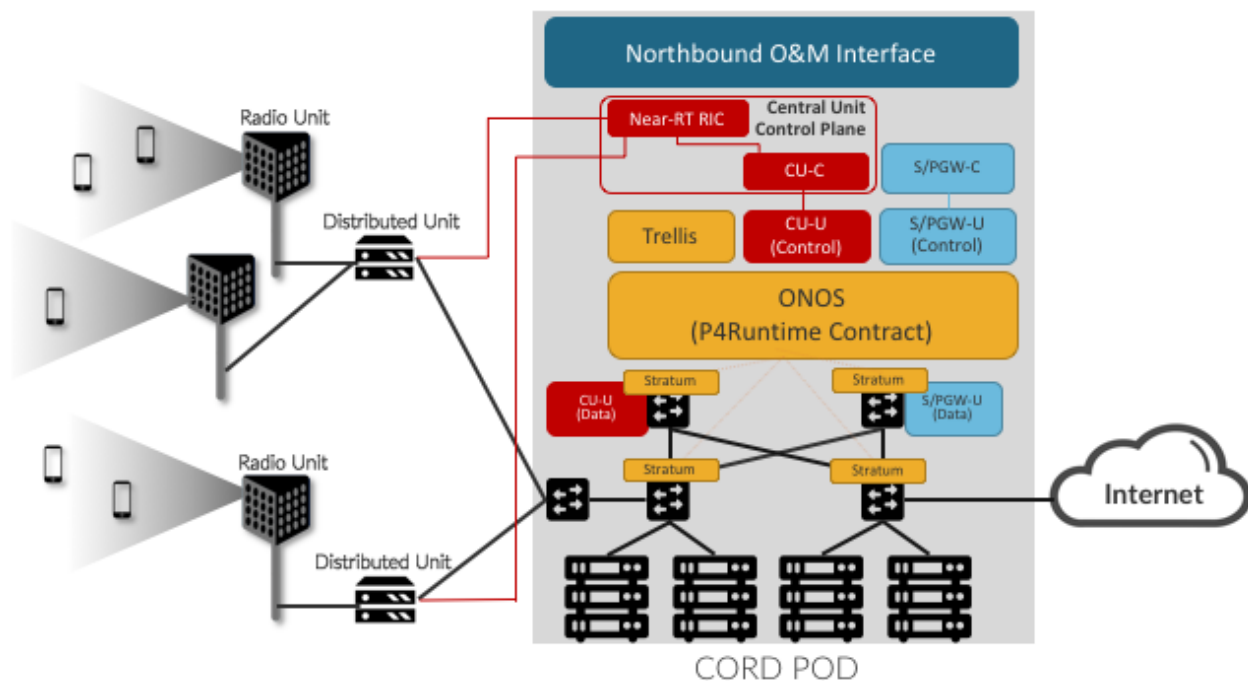


图 34. CORD 实现的 RAN 和移动核心网。

软件方面，图 34 显示了 RAN（红色）和移动核心网（蓝色），以及定义 CORD 平台的模块（橙色）。我们将在本章后面介绍平台组件，但您可以将它们看作是一个多租户云的整体实现，许多不同的可伸缩服务可以在其上运行。RAN 和移动核心网就是这样的两个租户。CORD 平台还可以承载其他边缘服务（这是 CORD 从一开始就使用云技术构建的原因之一），但有哪些边缘服务可以在 CORD POD 上运行不在本书讨论范围之内。

与 RAN 和核心网相关的组件在前面的章节中已经介绍过了，分别包括 CU 和移动核心网的控制平面和用户平面。为了简化起见，我们将 SGW 和 PGW 合并为单个 S/PGW。另一个值得关注的细节是 CU 控制面中包含的 RAN 控制组件，包括了 4.3 节介绍的近实时 RIC，这意味着一个 CORD POD 包含两个 SDN 控制器：控制 RAN 的 RIC，控

制网络的 ONOS（在 CORD 中运行的 RIC 实际上是 ONOS 的第二个定制版本，不过这是实现细节了）。

接下来我们来看一下 RAN 和移动核心网组件是如何实现的。具体来说，图中所示的功能组件有三种不同的表现形式：（1）CU-U 和 S/PGW-U 的数据面以 P4 程序加载到可编程交换机中实现；（2）CU-U 和 S/PGW-U 的控制面（以及 Trellis 平台模块）作为加载到 ONOS 上的控制应用实现；（3）其余组件实现为 Kubernetes 管理的微服务（Kubernetes 是隐含的，没有在图中显示出来）。

为了扩展这一思想，图 35 给出了 CORD POD 的另一种视图，舍弃了承载哪些服务的细节，而关注于这些服务是如何在 POD 上实例化的。在该图中，所有实例化到 POD 上的功能都是作为基于 Kubernetes 的微服务和基于 ONOS 的控制应用程序组合实现的。

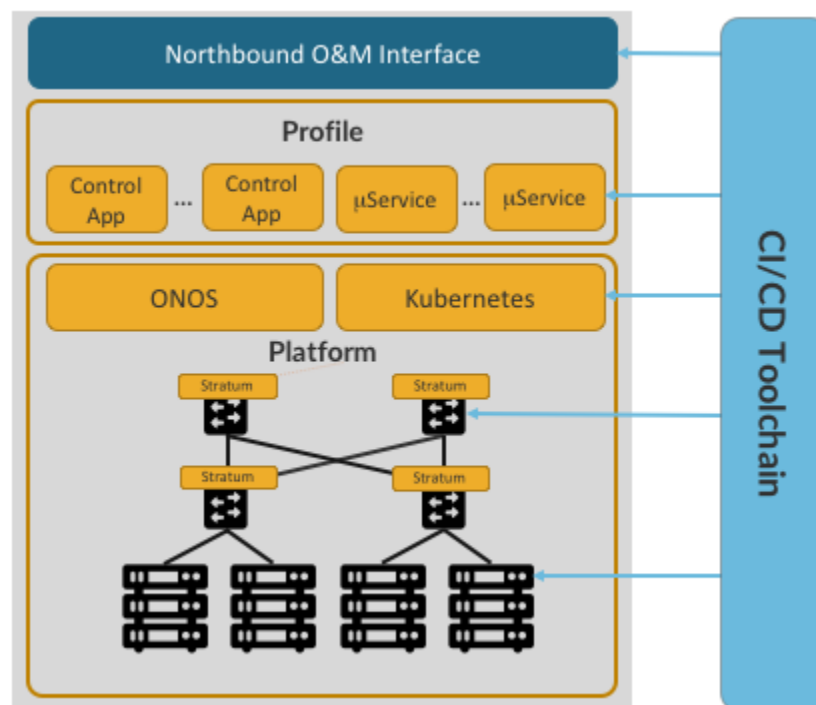


图 35. CORD 的另一种视图，通过 CI/CD 工具链管理平台和服务，这些服务是由基于 ONOS 的控制应用程序和基于 Kubernetes 的微服务组合实现。

当以这种方式进行抽象时，我们可以将 POD 视为三个子系统：

- **平台 (Platform)**：通用的基础层，包括作为容器管理系统的 Kubernetes，作为 SDN 控制器的 ONOS，每台交换机上都会加载的 Strata（开源交换机操作系统）。ONOS 和它托管的控制应用程序都是 Kubernetes 管理的微服务。
- **配置 (Profile)**：特定部署的微服务和 SDN 控制应用程序的集合，这些应用程序被调度在特定的 POD 上运行。这是一个可变的集合，还可以包括在其他地方描述的控制面和边缘服务。
- **CI/CD 工具链**：用于封装、部署、操作和升级特定的平台/配置，它通过一系列处理流程，将一组分离的、虚拟化的组件转换为能够响应运维工程师的指令并承载实时流量的操作系统。

CI/CD 工具链使用标准的 DevOps 工具将软件部署到服务器和交换机集群上，并在需要的时候可以隔离/回滚单个微服务和控制应用程序。它还可以基于 POD 配置自动生成管理 POD 的 NBI（Northbound Interface，北向接口），运维工程师可以在生产环境中通过 NBI 接口操作 CORD POD。

## 6.2. 平台组件 (Platform Components)

现在我们回头看一下图 34 和 35 中所示的三个平台相关组件。就其本身而言，每个组件都是一个开源项目，但就我们的目的而言，了解它们在支持 CORD 的 5G 配置中所扮演的角色就足够了。

- **Stratum**：轻量级白盒交换机操作系统，提供硬件无关接口，用于对 CORD 中的交换机进行管理和编程，支持通过 *P4* 定义交换机转发管道的行为（可以视为控制面和数据面之间的契约），以及使用 *P4Runtime* 在运行时控制转发。
- **ONOS**：网络操作系统，用于配置和控制由可编程白盒交换机组成的网络。逻辑上它作为集中的 SDN 控制器运行，并托管一组 SDN 控制应用程序，每个应用程序控制底层网络的某些功能。由于 ONOS 在逻辑上是集中式的，因此被设计为高可用性和可伸缩的。
- **Trellis**：ONOS 托管的 SDN 控制应用程序，用于在白盒交换机网络上实现叶脊网络。它支持多个应用的控制，包括 VLAN 和 L2 桥接、IPv4 和 IPv6 单播和组播路由、DHCP L3 中继、双链接（dual-homing）服务器、上行路由器、QinQ

转发/终止、MPLS pseudowires 等。此外，Trellis 可以使整个网络体现为一个单一的（虚拟的）路由器连接到上游路由器上，上游路由器使用标准的 BGP 与 Trellis 进行通信。

Stratum（运行在交换机上）和 ONOS（运行在交换机外部，管理整个交换机网络）通过以下接口进行通信：

- **P4**：定义可编程交换芯片的转发行为，以及对功能固定的 ASIC 管道建模。P4 程序定义了一个由控制面通过编程定义，并由数据面实现的契约。
- **P4Runtime**：为 SDN 准备的接口，用于控制运行时的转发行为，是用于配置转发表和控制转发状态的关键模块，其工作方式与硬件无关。
- **OpenConfig 模型**：定义了设备配置和管理的最小集。这些模型通过可编程的方式扩展特定于平台的功能，其目标是最小化模型之间的差异，从而支持与供应商无关的管理平面。
- **gNMI (gRPC 网络管理接口, gRPC Network Management Interface)**：为 SDN 准备的接口，通过使用二进制接口和双向流来改进现有配置接口，与 OpenConfig 模型配合使用。
- **gNOI (gRPC 网络运维接口, gRPC Network Operations Interface)**：一组用于支持特定交换机操作的微服务，如证书管理、设备测试、软件升级和网络故障排除等。gNOI 提供了语义丰富的 API，取代现有的基于 CLI 的方式。

Trellis 作为运行在 ONOS 上的 SDN 控制应用程序，可以控制从内部交换网络到 CORD POD 的包转发（在单个站点内）。但是 Trellis 也可以通过多个层级的脊柱网络扩展到多个站点，如图 36 所示。这意味着 Trellis 具有在 RAN 的中传和后传网络中发挥作用的潜力，也可以帮助将 RAN 扩展到客户现场（图中“On Site”域）。

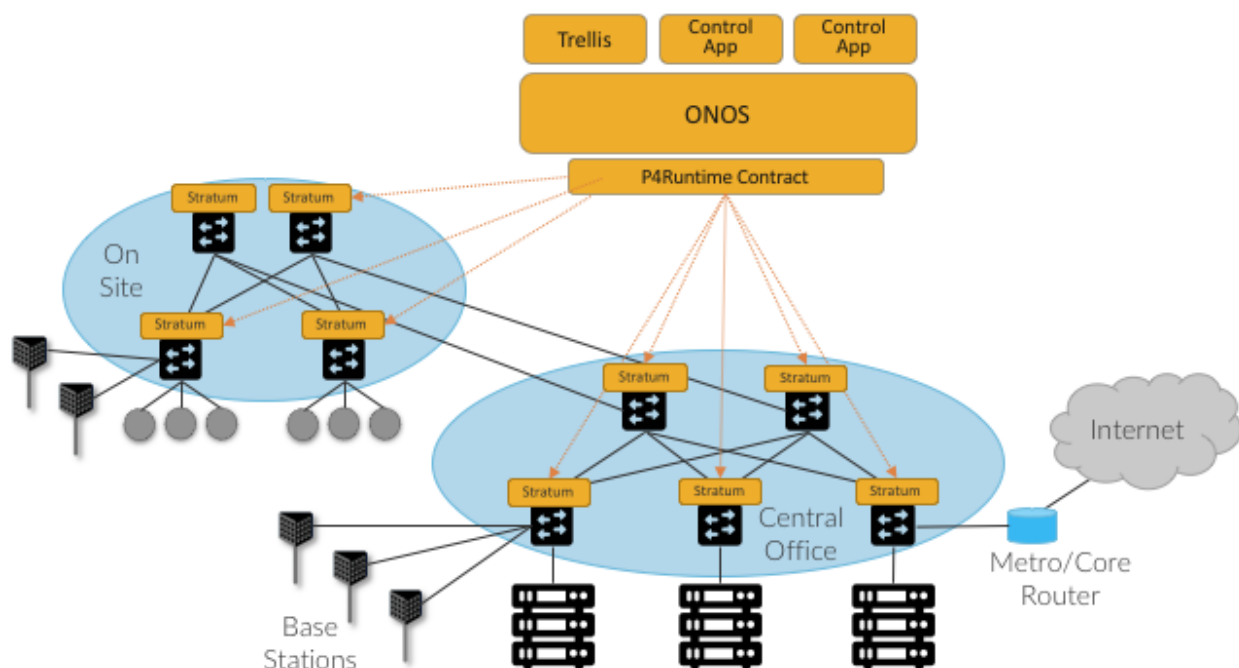


图 36. Trellis 控制应用程序管理(可能是分布式的)叶棘网络。

我们刚才介绍的软件栈非常庞大，有可能会破坏蜂窝网络现有的构建和运行方式。特别需要注意的是，图 34 所示的 RAN 智能控制器是作为 ONOS 的一组扩展实现的，这种架构将基于 ONOS 的 RIC 置于设计的中心，位于 SDN 和 5G 世界的交界处。

本次讨论虽然只聚焦于部署 5G 网络的一种选择，但这也说明了为什么 5G 被视为电信行业转型的原因之一。5G 架构充分利用了几个重要的、广泛的行业趋势，远超以往任何电信网络。融合了 SDN 的崛起、开源软件的力量及其在网络中日益广泛的使用，当然还有以云技术作为提供创新服务的基础。

### 延伸阅读

关于 SDN 软件栈的更多信息，推荐阅读：《软件定义的网络：一种系统方法 (Software-Defined Networks: A Systems Approach) 》<sup>[2]</sup>。

### Reference:

- [1] <https://guide.opencord.org/>
- [2] <https://sdn.systemsapproach.org/>

## 7. 云化接入网 (Cloudification of Access)

前几章以循序渐进的方式的方式介绍了 5G 相关内容。首先将 5G 分解为基本组件，然后展示如何以基于云的设计最佳实践将这些组件组装在一起，构建一个功能完整、符合 3GPP 规范的 5G 蜂窝网络。在这个过程中，我们很容易忽略蜂窝网络正在经历一场戏剧性变革这个大图景，而这才是 5G 的意义所在。最后，我们将对这一大趋势提供一些观察思考。

### 7.1. 多云部署 (Multi-Cloud)

要理解将云技术应用于接入网的影响，首先要了解云。云计算从根本上改变了我们的计算方式，更重要的是，改变了创新的步伐。它通过以下组合来做到这一点：

- **分解 (Disaggregation)**：基于开放接口将垂直集成的系统分解成独立的组件。
- **虚拟化 (Virtualization)**：能够在通用硬件平台上运行这些组件的多个独立副本。
- **通用化 (Commoditization)**：能够根据工作负载的要求，在通用硬件上弹性伸缩这些虚拟组件。

同样的情况也会发生在接入网上，或者从另一个角度来看，云本质上就可以扩展到接入网。

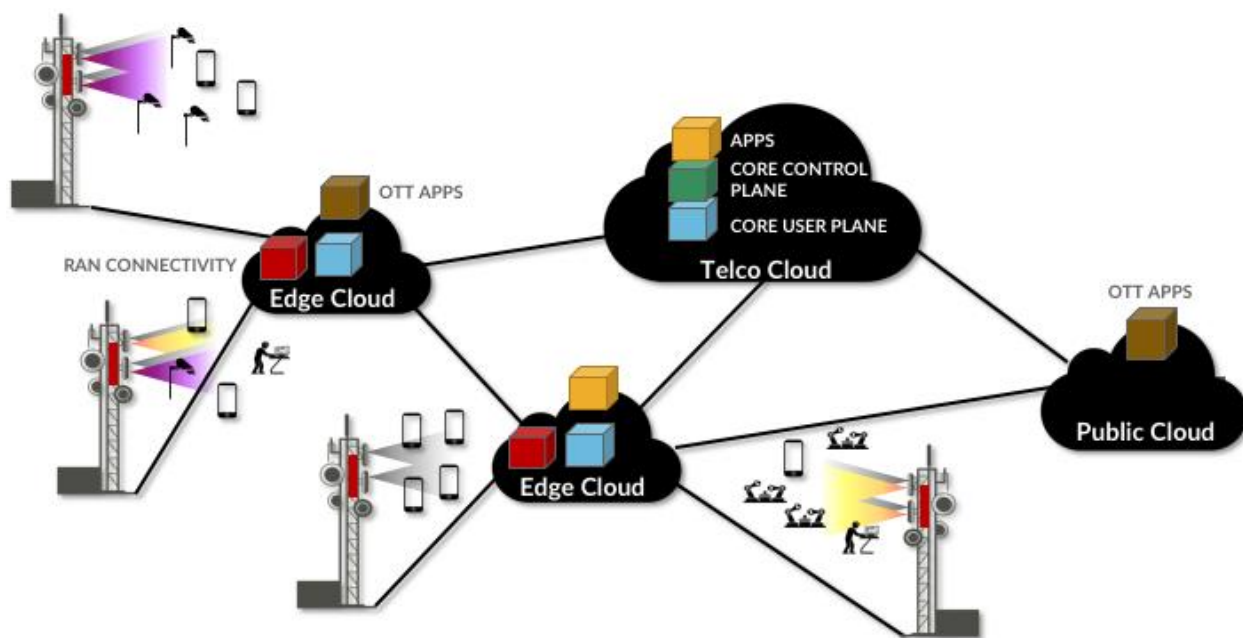


图 37. 多租户云的集合——包括虚拟化的 RAN 资源以及传统的计算、存储和网络资源——托管的电信和 OTT 服务以及应用程序。

图 37 从一个较高的角度展示了最终有可能会演进成怎样的架构，整个云跨越了边缘云、私有电信云和公有云，我们将这种云的集合称为“多云（multi-cloud）”。每个独立的云站点都可能属于不同的组织（包括蜂窝基站），因此，每个站点都可能是多租户的，能够为其其他人和组织托管（和隔离）应用程序。这些应用程序将包括 RAN 和核心网服务（如本书前面所述）的组合，在公有云中常见的 OTT（Over-the-Top）应用程序（现在也分布在边缘云上），以及新的电信管理应用程序（同样分布在中心和边缘位置上）。

最终，我们可以期待会有通用 API 出现，从而降低任何人（不仅仅是今天的网络运营商或云服务提供商）获取所需的存储、计算、网络和连接资源来跨多个站点部署应用程序的障碍。

## 7.2. 边缘云即服务（EdgeCloud-as-a-Service）

在上一节讨论的所有内容中，将支持 5G 的边缘云部署为集中管理的服务，正在获得越来越多的关注。如图 38 所示，其思想是在企业中部署边缘云，配置 RAN 和移动核心网



的用户面组件（以及企业希望在本地运行的任何边缘服务），然后从中心云管理该边缘部署。中心云负责运行边缘云的管理门户，以及移动核心网的控制面。这类似于在 5.2 节中讨论的多云配置，只是增加了能够从单个中心位置管理多个边缘部署的特性。

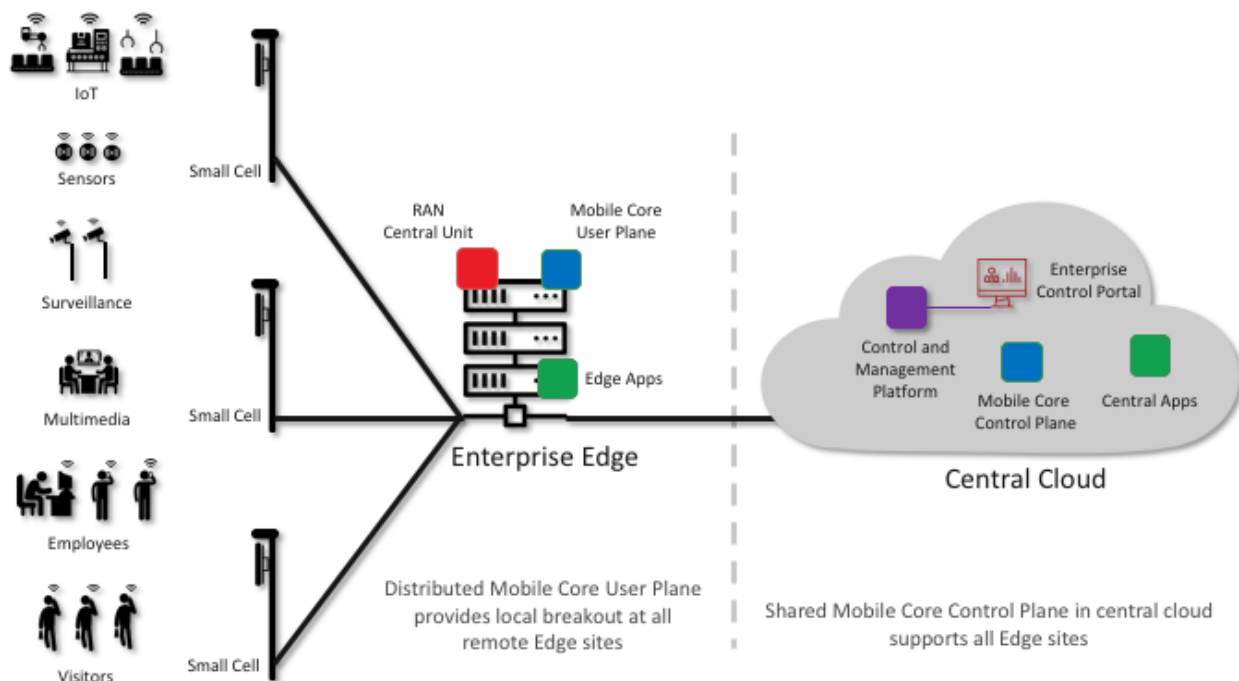


图 38. EdgeCloud-as-a-Service 是一种托管服务，RAN 和移动核心网用户面组件运行在企业中，移动核心网的控制面(以及管理门户)集中运行在公有云中。

这种部署的价值在于将 5G 无线网的优势引入企业，包括支持实时控制大量移动设备所需的可预测、低延迟通信。工厂自动化是这种边缘云的一个重要用例，对物联网的支持是 ECaaS 发展的重要动力。

可以想到，最近的很多商业活动都和这个方向有关。不过现在也有这方面的开源项目，Aether 是一个典型，现在可供早期采用者评估和试验。Aether 是 ONF 运营的 ECaaS，支持 4G 和 5G，由本书中所介绍的开源组件构建。Aether 可以使用授权或者和非授权的频段（如 CBRS），当然非授权频段可以让这样的部署更容易。图 39 描述了 Aether 的集中管理、多站点部署的早期架构。

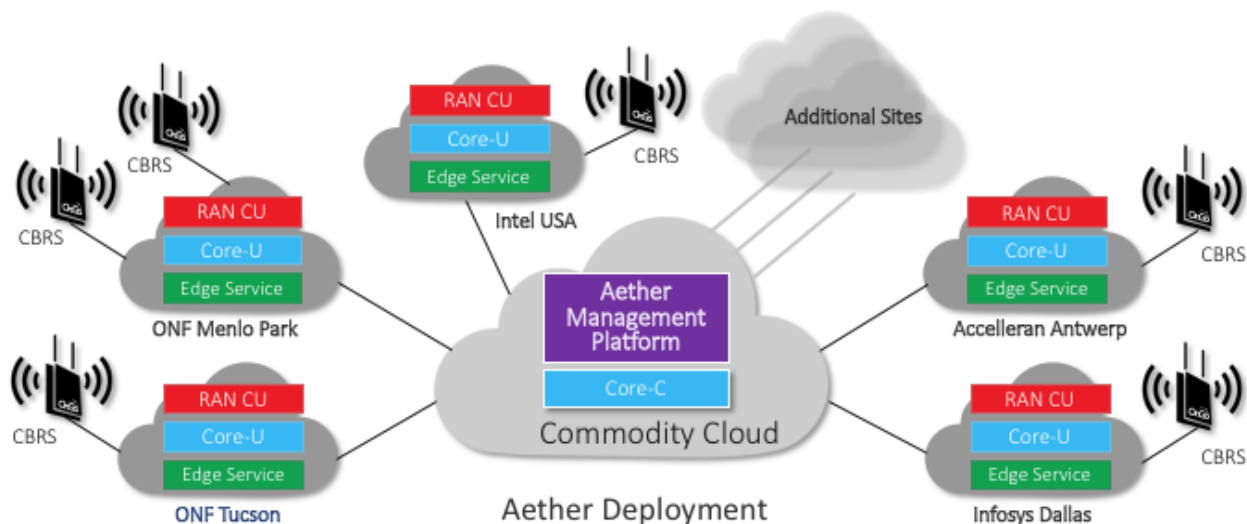


图 39. Aether 是由 ONF 运营的 EdgeCloud-as-a-Service，由 SD-RAN 和本书中介绍的解耦的移动核心网组件构建而成。Aether 包括一个运行在公有云中的集中管理平台。

请注意，图 39 中的每个边缘站点对应于第 6 章中描述的 CORD POD，该 POD 经过重新配置，从而将移动核心网的运维接口和控制组件卸载到中心云上。

### 延伸阅读

有关 Aether 的更多信息，请访问 Aether 官网<sup>[1]</sup>。

## 7.3. 研究方向 (Research Opportunities)

还有大量问题需要研究解决，才能让本章描述的场景成为现实，其中许多问题是由于接入网络和边缘云之间界限模糊的结果，我们将其称为接入边缘 (access-edge)，下面我们通过例举一些挑战和机遇的例子来总结这些问题：

- **多接入 (Multi-Access)**：接入边缘将需要支持多种接入技术（如 WiFi、5G、光纤等），并允许用户在它们之间无缝移动。需要进行研究以打破现有技术壁垒，并为常见问题（如安全性、移动性、QoS 等）设计融合解决方案。
- **异构性 (Heterogeneity)**：由于接入边缘将会被要求支持低延迟和高带宽连接，许多边缘功能将通过可编程白盒交换机实现，使用特定领域处理器（例如 GPU、TPU 等）也将更为普遍。需要研究如何调整边缘服务以利用异构资源，以及如何利用这些构建块的集合构建端到端应用程序。

- **虚拟化 (Virtualization)**：接入边缘将使用一系列技术将底层硬件资源虚拟化，从虚拟机到容器到无服务器架构，通过一系列 L2、L3 和 L4/7 虚拟网络互连，其中某些部分将由 SDN 控制应用程序管理。关于如何虚拟化计算、存储和网络资源，需要对云原生服务和面向接入的 VNF (Virtualized Network Functions, 虚拟化网络功能) 的假设进行协调研究。
- **多租户 (Multi-Tenancy)**：接入边缘将支持多租户，可能有不同的相关方（运维人员、服务提供商、应用程序开发人员、企业等）负责管理不同的组件。由于不同的组件需要以不同的自治级别运行，因此不太可能在单个信任域中部署整个接入边缘。如何最小化租户隔离造成的额外开销，还需要进行研究。
- **定制化 (Customization)**：需要能够为不同类型的用户和应用程序提供差异化、定制的服务，才能最大程度提升接入边缘的变现价值。这被称为网络切片（参见第 5.3 节），涉及到在服务链粒度（代表支撑某些用户服务的功能组件）上支持性能隔离。需要进行研究以加强性能隔离，以保证服务质量。
- **近实时 (Near-Real Time)**：接入边缘将是一个高度动态的环境，具有不断适应移动性、工作负载和应用程序需求的能力。支持这样的环境需要严格的控制回路，控制软件将在边缘运行。需要研究和分析控制回路，定义基于分析的控制器，并设计动态适应机制。
- **数据规约 (Data Reduction)**：接入边缘将连接越来越多的设备（不仅仅是手机），所有这些设备都能够产生数据。支持数据规约将是至关重要的，这意味着在接入边缘需要消耗大量算力（可能包括特定领域处理器）。需要研究将应用程序重构为边缘规约和后端分析两个子组件的方法。
- **分布式服务 (Distributed Services)**：所有服务本质上都将是分布式的，一些功能运行在接入边缘，一些功能运行在数据中心，一些功能运行在本地或终端设备（例如车载设备）。支持这样的环境需要多云解决方案，从而与任何单一基础设施解耦。需要研究怎样以启发式方法进行功能布局。
- **可伸缩性 (Scalability)**：接入边缘可能会跨越数千甚至数万个边缘站点，与管理单个数据中心相比，远程协调许多边缘站点的能力（即使只是在基础设施级别）本质上是一个不同的挑战。需要研究怎样扩展边缘平台以及支持大规模部署的边缘服务。

## 延伸阅读

想要更好的理解在接入边缘的研究机会，可以参考 2019 年 4 月发表于 ACM SIGCOM M CCR 的《民主化的网络边缘（Democratizing the Network Edge）》<sup>[2]</sup>。

## 关于本书

本书的 Github 仓库<sup>[3]</sup>提供了 *5G 移动网络: 一种系统方法* 的源代码，遵循知识共享协议 (CC BY-NC-ND 4.0)<sup>[4]</sup>许可条款。我们邀请社区一起在相同的条件下更正、改进、更新本书以及为本书提供新的素材。

如果你打算使用本书内容，请保留以下信息：

*Title: 5G Mobile Networks: A Systems Approach*

*Authors: Larry Peterson and Oguz Sunay*

*Source: <https://github.com/SystemsApproach/5G>*

*License: CC BY-NC-ND 4.0<sup>[4]</sup>*

## 阅读本书

本书是系统方法系列<sup>[5]</sup>的一部分，在线版本在 <https://5G.systemsapproach.org> 上发布。

要跟踪项目进展并收到关于新版本的通知，可以在 Facebook<sup>[6]</sup>和 Twitter<sup>[7]</sup>上跟踪项目。要跟踪关于互联网如何发展的讨论，请在 Substack 上订阅系统方法<sup>[8]</sup>。

## 构建本书

你可以下载源代码，从而构建一个 Web 版本：

```
$ mkdir ~/5G$ cd ~/5G$ git clone https://github.com/SystemsApproach/5G.git
```

复制代码

构建依赖 Python，构建过程定义在 Makefile 中。Makefile 将创建一个虚拟环境（doc\_venv），用于安装文档生成工具集。

要生成 HTML，请在 `_build/html` 下面执行 `make html`。

检查本书的格式，执行 `make lint`。

执行 `make` 可以看到还支持哪些输出格式。

## 为本书做出贡献

如果你使用本书提供的内容，那我们也希望你愿意作出为本书做出贡献。如果您对开源项目不熟悉，可以查看“如何为开源项目做出贡献”指南<sup>[9]</sup>。除了其他事情，你还将学到如何发布你希望得到解决的问题 (*Issues*)，并学会如何发出 *Pull Requests* 将你的改动合并到 GitHub。

如果你想要投稿，并且正在寻找一些需要关注的事情，请查看 [wiki<sup>\[10\]</sup>](#) 上当前的待办事项列表。

## 关于作者

**Larry Peterson** 是普林斯顿大学计算机科学系的 Robert E. Kahn 名誉教授（该教席以 TCP/IP 的发明人 Robert E. Kahn 命名），他在 2003 年到 2009 年担任该系主任。他是最畅销的网络教材《*计算机网络：系统方法 (Computer Networks: A Systems Approach)*》（第六版）的合著者，该教材现已在 GitHub 上开源。他的研究重点是互联网级分布式系统的设计、实现和操作，包括广泛使用的 PlanetLab 和 MeasurementLab 平台。他目前在开放网络基金会 (ONF) 领导 CORD 和 Aether 接入边缘云项目，并担任首席技术官。Peterson 教授是美国国家工程院的院士，ACM 和 IEEE 研究员，2010 年 IEEE 小林计算机和通信奖的获得者，2013 年 ACM SIGCOMM 奖的获得者。他于 1985 年获得普渡大学博士学位。

**Oguz Sunay** 目前是 ONF 的研发副总裁，负责所有移动相关项目。在此之前，他曾担任 ONF 的移动网络首席架构师。在加入 ONF 之前，Sunay 是 Argela-USA 的首席技

术官，他是 5G 可编程无线接入网架构（ProgRAN）的发明人，该架构实现了世界上第一个动态可编程 RAN 切片解决方案。他还曾在诺基亚研究中心和贝尔实验室工作，在那里他专注于 3G 和 4G 端到端系统架构，并参与和主持各种标准化活动。Sunay 在学术界工作了 10 多年，担任电气和计算机工程教授。他在 3G、4G 和 5G 的各个方面拥有许多美国和欧洲专利，并撰写了许多期刊和会议出版物。他在土耳其 METU 获得学士学位，在加拿大皇后大学获得硕士和博士学位。

## Reference:

- [1] <https://www.opennetworking.org/aether/>
- [2] <https://ccronline.sigcomm.org/wp-content/uploads/2019/05/acmdl19-289.pdf>
- [3] <https://github.com/SystemsApproach/5G>
- [4] <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
- [5] <https://www.systemsapproach.org/>
- [6] <https://www.facebook.com/Computer-Networks-A-Systems-Approach-110933578952503/>
- [7] <https://twitter.com/SystemsAppr>
- [8] <https://systemsapproach.substack.com/>
- [9] <https://opensource.guide/how-to-contribute/>
- [10] <https://github.com/SystemsApproach/5G/wiki>

## 关于译者

**俞凡** 在 Motorola 做过研发，现在在 Mavenir 做技术总监，对通信、网络、后端架构、云原生、DevOps、CI/CD、区块链、AI 等技术始终保持着浓厚的兴趣，平时喜欢阅读、思考，相信持续学习、终身成长，欢迎一起交流学习。微信公众号：DeepNoMind。