

5G核心网中服务化架构与控制面用户面分离技术研究进展

潘小瑞 米良彬

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 5G为满足增强型移动宽带、超高可靠低时延通信和海量机器类通信三大场景的差异化需求,其核心网(5GC)在架构上革命性重构,摒弃4G EPC“烟囱式”网元设计,引入服务化架构(SBA)和控制面/用户面分离(CUPS)两大关键技术。本文深入剖析二者技术原理、核心组件及协同关系: SBA借模块化、可重用服务实现网络功能灵活编排与自动化; CUPS通过解耦控制逻辑与数据转发,提升网络部署灵活性与边缘计算能力。重点分析二者融合的技术优势,系统梳理当前在标准化、安全、运维及性能优化等方面面临的挑战。最后,展望面向6G的网络架构演进趋势,为未来网络研究与实践提供参考。

关键词: 5G核心网; 服务化架构(SBA); 控制面/用户面分离(CUPS)

引言

物联网等新兴技术发展使全球数据流量爆炸式增长,对移动通信网络提出新要求。ITU定义的5G三大场景有高带宽、低时延高可靠和海量连接等极端需求,传统4G LTE核心网“点对点”互联模式架构僵化、扩展困难,难以支撑5G多样化业务。为此,3GPP在Release 15及后续版本中对5G核心网(5GC)进行颠覆设计,服务化架构(SBA)和控制面/用户面分离(CUPS)是其两大支柱。SBA借鉴微服务思想,提升网络敏捷性与可编程性; CUPS源于SDN理念,为关键技术提供架构基础。SBA与CUPS深度交织、相互促进,协同构建开放、弹性、智能的5G核心网。但新型架构从理论走向商用面临诸多挑战,本文将全面回顾其研究进展,剖析技术细节等,为从业者提供洞见。

1 5G核心网服务化架构(SBA)

1.1 SBA的基本概念与设计哲学

SBA是5GC区别于前代网络的显著特征,将传统EPC中耦合的网元分解为细粒度、松耦合的网络功能(NF)。每个NF提供网络服务(NS),通过基于HTTP/2和JSON的服务化接口(SBI)交互。这实现了从静态实体到动态生态系统的转变,受云原生和微服务架构影响,追求模块化与解耦,降低系统复杂性,提升服务可重用性^[1]。控制面NF设计为无状态或准无状态,关键状态信息集中存储,便于水平扩展和故障替代,保障网络弹性。标准化API使网络高度可编程,为网络切片奠定基础。

1.2 SBA的核心网络功能(NF)

5GC由关键NF组成,协同完成核心任务。AMF负责

用户初始接入认证、注册及移动性管理; SMF管理用户数据会话全生命周期; UPF承担用户数据包处理。支撑性NF中,UDM存储用户数据; PCF提供策略决策; NSSF匹配网络切片; NEF连接外部应用; NRF实现服务自动发现与对接。

1.3 SBA的通信机制

SBA内部通信依赖两种机制。服务化接口(SBI)基于RESTful API风格,用HTTP/2承载,JSON格式消息体,降低功能耦合度,增强灵活性。对性能、时延要求高或交互模式固定的功能对,保留传统点对点参考点接口,如SMF与UPF间的N4接口,平衡架构理想化与工程约束。

2 控制面/用户面分离(CUPS)

2.1 CUPS的技术背景与核心思想

控制面/用户面分离(CUPS)的概念最早在4G EPC的后期演进(如SGW-C/SGW-U, PGW-C/PGW-U)中有所尝试,但在5GC中得到了彻底和标准化的实现。其核心思想源于SDN的“控制与转发分离”原则。在传统网络中,控制面和用户面紧密耦合在同一物理设备中。这种耦合导致了诸多问题:一是部署不灵活:为了靠近用户以降低时延,必须将整个网元(包含昂贵的控制面资源)下沉到网络边缘。二是扩展效率低:当用户数据流量激增时,即使控制面负载不高,也不得不扩容整个网元,造成资源浪费。三是阻碍边缘计算:无法将纯粹的数据转发功能(UPF)部署在离用户最近的边缘数据中心。CUPS通过将决策(控制面)与执行(用户面)分离,完美解决了上述问题。控制面NF(如SMF)负责制定策略和规则,而用户面NF(UPF)则忠实地执行这些

规则,进行高速数据包处理。

2.2 CUPS在5GC中的实现

在5GC中,CUPS的体现尤为清晰:控制面由AMF、SMF、PCF、UDM等一系列无状态的、基于SBA的NF构成。它们运行在中心云或区域云的数据中心,负责全局的信令处理、策略决策和会话管理。用户面由分布式的UPF构成。UPF可以根据业务需求,灵活地部署在从中心DC到区域DC,再到边缘DC(MEC)甚至基站侧的不同位置。SMF与UPF的协同是CUPS的关键。当一个用户会话建立时,SMF会根据网络切片、QoS要求、UE位置等信息,从可用的UPF池中选择一个或多个最优的UPF,并通过N4接口下发具体的转发规则(如GTP隧道信息、QoS流映射、计费规则等)^[2]。UPF接收到规则后,即可独立地、高效地处理用户数据流,无需再与SMF进行频繁交互。这种“一次配置,多次执行”的模式,极大地降低了控制面信令开销,提升了数据转发效率。

3 SBA与CUPS的协同机制与优势

3.1 协同机制

(1) 服务化驱动的UPF管理:UPF虽然是用户面实体,但其生命周期管理和能力注册同样遵循SBA原则。UPF在启动后,会向NRF注册自身的能力(如支持的QoS模型、地理位置、处理能力等)。当SMF需要为某个会话选择UPF时,它会向NRF查询符合特定条件(如靠近某地理区域、支持uRLLC切片)的UPF列表。这种基于服务发现的机制,使得UPF的部署和选择变得高度自动化和策略驱动。(2) 策略驱动的CUPS:PCF作为策略中心,其决策直接影响CUPS的部署形态。例如,一个uRLLC切片的策略可能会要求SMF必须选择部署在MEC边缘的UPF,以确保端到端时延。SBA为PCF策略的下发和执行提供了无缝通道。(3) 网络切片的基石:网络切片的本质是为不同业务提供定制化的逻辑网络。SBA通过按需组合不同的NF实例来构建切片的控制面,而CUPS则通过为不同切片分配独立的、位置优化的UPF实例来构建切片的用户面。二者结合,使得每个网络切片都能拥有完全隔离且性能最优的端到端路径。

3.2 技术优势

(1) 极致的部署灵活性:运营商可以根据业务热点、成本和性能要求,将UPF精准部署在任何需要的位置(中心、区域、边缘),而控制面可以集中部署以简化运维。这种“按需下沉”模式是支撑MEC和uRLLC的关键。(2) 高效的资源利用与弹性伸缩:控制面和用户面可以独立进行容量规划和弹性伸缩。在视频直播等流量突发场景下,只需扩容UPF;而在大规模用户同时附

着的场景下,则主要扩容SMF/AMF。这种精细化的资源管理显著降低了CAPEX和OPEX。(3) 加速业务创新:SBA的开放API(通过NEF)使得第三方开发者能够便捷地调用网络能力(如精确位置、确定性时延保障)。结合边缘UPF提供的本地数据处理能力,催生了大量创新的垂直行业应用,如工业互联网、远程医疗、车联网等^[3]。(4) 简化网络运维:无状态的控制面NF和自动化的服务发现机制,使得网络故障自愈、滚动升级和灰度发布变得更加容易,提升了网络的健壮性和运维效率。

4 研究挑战与关键技术问题

4.1 标准化与互操作性挑战

虽然3GPP定义了SBA和CUPS的基本框架,但许多细节(如服务的粒度、API的具体实现、NF间的交互流程)仍留有厂商自定义的空间。这可能导致不同厂商设备之间的互操作性问题,形成新的“烟囱”。推动更精细、更完备的开源项目(如ONAP,OSM)和行业测试规范,是解决此问题的关键。

4.2 安全与隐私风险

SBA的开放性和服务化接口在带来便利的同时,也显著扩大了网络的攻击面。基于HTTP/2的SBI接口虽然易于集成,但也需要部署强大的认证、授权和加密机制(如OAuth 2.0和TLS)来抵御未授权访问、服务仿冒和中间人攻击等威胁。作为整个SBA服务注册中心的NRF,其安全性至关重要,一旦被攻破,可能导致服务注册信息被篡改,进而引发全网范围的服务混乱,因此必须实施严格的准入控制和全面的审计追踪。此外,大量部署在物理安全环境相对较弱的边缘位置的UPF,也面临着被物理攻击或恶意篡改的风险,亟需通过安全启动、可信执行环境(TEE)和远程证明等技术来加固其安全防线。最后,通过NEF开放的网络能力往往涉及用户的敏感信息,如何在赋能第三方应用创新与严格保护用户数据隐私之间取得平衡,是必须审慎对待的法律和伦理问题。

4.3 运维复杂性与智能化需求

SBA/CUPS架构的动态性、分布式和虚拟化特性,使得网络拓扑和流量路径变得异常复杂和多变,传统的、基于固定网元的静态运维模式已经完全失效。运维团队现在面临着如何有效保障端到端网络切片SLA的巨大挑战,因为一个切片的性能表现是其所有组成NF(包括分布在各地的UPF)共同作用的结果。为了应对这种复杂性,网络运维正迫切地向AI驱动的智能运维(AIOps)方向演进。通过利用机器学习算法对来自全网的海量日志、性能指标和追踪数据进行实时分析,有望实现故障的提前预测、根因的快速定位以及修复措施

的自动执行^[4]。这一切都依赖于一个统一的、跨NF、跨地域的可观测性体系，该体系能够将Logging（日志）、Metrics（指标）和Tracing（分布式追踪）三大支柱数据进行关联分析，为运维人员提供一个清晰、完整的全局网络视图。

4.4 性能优化与服务质量保障

在性能层面，UPF作为用户数据的唯一出口，其转发性能直接决定了整个网络的用户体验上限。UPF需要在通用的x86服务器上处理线速的用户数据流，这对软硬件协同提出了极高要求。如何充分利用智能网卡（SmartNIC）或数据处理器（DPU）等硬件卸载技术，并结合DPDK、VPP等高性能用户态网络数据平面软件，以在成本可控的前提下实现电信级的转发性能，是持续的研究热点。在复杂的网络拓扑中，例如多UPF串联的上行链路分类器（UL CL）场景，或者跨国漫游场景下，如何智能地优化端到端的数据路径，避免不必要的流量迂回，是保障uRLLC等苛刻业务体验的关键所在。此外，尽管控制面NF被设计为无状态，但其背后所依赖的状态数据库（如UDM）的读写性能、数据一致性和高可用性，直接制约着整个控制面的信令处理能力和响应速度，这也是一个不容忽视的性能瓶颈。

5 未来演进方向

面向6G和更远的未来，SBA与CUPS架构将继续深化和演进。（1）深度融合AI/ML：未来的网络功能将内生AI能力。例如，SMF可以利用AI预测用户移动轨迹，提前在目标区域预置UPF资源；UPF可以利用内嵌的AI模型进行智能流量识别和安全检测。（2）算力网络（CPN）：SBA/CUPS架构将进一步与算力调度融合。网络不仅调度连接和带宽，还将调度泛在的计算资源（CPU, GPU, NPU）。NEF将演变为算力开放接口，支持“连接+计算”的一体化服务编排。（3）至简网络架构：通过进一步抽象和融合，减少NF的数量和类型。例

如，探索AMF和SMF的融合，或者将更多控制逻辑下沉到UPF，形成更扁平、更高效的架构。（4）内生安全架构：安全能力将不再是附加功能，而是内生于SBA的每一个服务和CUPS的每一个节点。零信任架构（ZTA）将成为默认的安全范式。（5）通感一体（ISAC）：未来的UPF可能集成感知能力，利用通信信号进行环境感知。SBA需要为此类新型NF定义新的服务接口和交互模式。

6 结语

服务化架构（SBA）与控制面/用户面分离（CUPS）是5G核心网实现其宏伟愿景的两大基石。SBA通过微服务化和API化，赋予了网络前所未有的灵活性、可编程性和开放性；CUPS则通过解耦控制与转发，实现了网络部署的极致灵活和资源利用的高效化。二者的深度融合，不仅成功支撑了5G三大应用场景，还为网络切片、边缘计算等创新技术铺平了道路。然而，通往全面商用的道路并非坦途。标准化、安全、运维和性能等方面的挑战依然突出。未来的研究与实践需要在巩固现有成果的基础上，积极探索与AI、算力网络等新兴技术的融合，推动网络架构向更智能、更简约、更安全的方向持续演进。可以预见，SBA与CUPS所奠定的架构范式，其影响力将超越5G，成为未来十年乃至更长时间内通信网络发展的核心指导思想。

参考文献

- [1]成静静,陈瑞鑫,许鸿辉,等.基于控制面与用户面分离的5G电力虚拟专网关键技术研究[J].数据通信,2025,(06):21-27.
- [2]张丹,王磊,王晓琦,等.5G网络中NSA控制面和用户面时延性能分析[J].电信科学,2020,36(09):141-147.
- [3]黄莹.基于NOMA的无线接入网控制面与用户面分离技术研究[D].西安电子科技大学,2020.
- [4]Fadel A M H A.基于控制面和用户面分离的平流层蜂窝网络性能分析[D].西安电子科技大学,2022.