



信息通信领域产学研合作特色期刊 十佳皖刊  
第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2020年6月·第3期

**专题：5G 核心网技术与挑战**



# 《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

**顾问** 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） | 钟义信（北京邮电大学教授） | 陈锡生（南京邮电大学教授）

**主任** 陆建华（中国科学院院士）

**副主任** 李自学（中兴通讯股份有限公司董事长） | 糜正琨（南京邮电大学教授）

## 编委（按姓名拼音排序）

陈建平	上海交通大学教授	唐雄燕	中国联通网络技术研究院首席科学家
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	陶小峰	北京邮电大学教授
葛建华	西安电子科技大学教授	王文博	北京邮电大学教授、副校长
管海兵	上海交通大学教授	王文东	北京邮电大学教授
郭庆	哈尔滨工业大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
洪波	中兴发展股份有限公司总裁	王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
洪伟	东南大学教授	卫国	中国科学技术大学教授
黄宇红	中国移动研究院副院长	吴春明	浙江大学教授
纪越峰	北京邮电大学教授	邬贺铨	中国工程院院士
江涛	华中科技大学教授	肖甫	南京邮电大学教授
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	解冲锋	中国电信研究院教授级高工
李尔平	浙江大学教授	徐安士	北京大学教授
李红滨	北京大学教授	徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
李厚强	中国科学技术大学教授	续合元	中国信息通信研究院副总工
李建东	合肥工业大学教授、副校长	薛向阳	复旦大学教授
李军	清华大学教授	薛一波	清华大学教授
李乐民	中国工程院院士	杨义先	北京邮电大学教授
李融林	华南理工大学教授	杨震	南京邮电大学教授、原校长
李少谦	电子科技大学教授	叶茂	电子科技大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长	易芝玲	中国移动研究院首席科学家
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	张宏科	北京交通大学教授
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	张平	中国工程院院士
刘建伟	北京航空航天大学教授	张卫	复旦大学教授
陆建华	中国科学院院士	张云勇	中国联通集团产品中心总经理
马建国	广东工业大学教授	赵慧玲	工业和信息化部科技委信息通信网络专家组组长
孟洛明	北京邮电大学教授	郑纬民	中国工程院院士
糜正琨	南京邮电大学教授	钟章队	北京交通大学教授
任品毅	西安交通大学教授	周亮	南京邮电大学教授
石光明	西安电子科技大学教授、副校长	朱近康	中国科学技术大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	祝宁华	中国科学院半导体研究所研究员
谈振辉	北京交通大学教授		

# 目次

中兴通讯技术 (ZTE TECHNOLOGY JOURNAL)  
总第152期 第26卷 第3期 2020年6月

## 专题：5G 核心网技术与挑战

- 5G 核心网的部署问题与建议 **03**  
聂衡, 赵慧玲, 毛聪杰
- 5G 核心网商用关键技术与挑战 **09**  
王卫斌, 陆光辉, 陈新宇
- 5G 核心网规划建设的挑战及策略 **17**  
肖子玉
- 5G 核心网技术演进及挑战 **23**  
赫罡, 苗杰, 童俊杰
- MEC 的云边协同分析 **27**  
杨鑫, 赵慧玲
- 硬件加速在核心网转发面应用的思考和实践 **31**  
王升, 班有容, 陈佳媛, 张昊
- ENI 辅助的 5G 网络切片智慧运营 **37**  
王海宁

- 43** 5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨  
马晨昊, 解冲锋, 郑伟, 李聪

- 49** 5G 核心网创新技术研究及应用探索  
陆光辉, 毛磊, 冯建业

## 专家论坛

- 56** 网络融合深化使能 5G 全场景多维度服务  
孙滔, 陆璐, 刘超

## 企业视界

- 61** 6G 技术挑战、创新与展望  
方敏, 段向阳, 胡留军

- 71** 5G 赋能 B 端, 助力行业转型  
左罗, 陈亚斌

## 技术广角

- 78** 高稳频窄线宽半导体激光器  
陈伟, 班德超, 穆春元

## 2020 年第 1—6 期专题计划及策划人

### 1. 蜂窝车联网产业与技术

中国移动通信研究院首席科学家 易芝玲  
中国移动通信研究院技术经理 潘成康

### 2. 智能化通信应用芯片技术

中国科学院半导体研究所研究员 祝宁华  
中国科学院半导体研究所研究员 李明

### 3. 5G 核心网技术与挑战

工业和信息化部科技委  
信息通信网络专家组组长 赵慧玲

### 4. 无线网络空中计算

中国科学技术大学教授 卫国  
中国科学技术大学副研究员 陈力

### 5. 网络人工智能技术

电子科技大学教授 虞红芳

### 6. 工业互联网技术与应用

中国信息通信研究院副总工 续合元

# CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 26 No. 3 Jun. 2020

## Special Topic: Technologies and Challenges of 5G Core Network

Deployment Issues and Suggestions of 5G Core Network **03**  
NIE Heng, ZHAO Huiling, MAO Congjie

Key Technologies and Challenges of  
Commercial 5G Core Network **09**  
WANG Weibin, LU Guanghui, CHEN Xinyu

Challenges and Strategies of 5G Core Network  
Planning and Construction **17**  
XIAO Ziyu

Technologies Evolution and Challenges of  
5G Core Network **23**  
HE Gang, MIAO Jie, TONG Junjie

MEC Cloud-Edge Collaboration **27**  
YANG Xin, ZHAO Huiling

Thinking and Practice of Hardware Acceleration in  
Core Network Forwarding Application **31**  
WANG Sheng, BAN Yourong, CHEN Jiayuan,  
ZHANG Hao

ENI Assisted Intelligent 5G Network Slicing Operation **37**  
WANG Haining

**43** IPv6 Deployment in 5G SA Network  
MA Chenhao, XIE Chongfeng, ZHENG Wei, LI Cong

**49** Research and Application of 5G Core Network  
Innovation Technologies  
LU Guanghui, MAO Lei, FENG Jianye

## Expert Forum

**56** Deep Network Convergence Enables 5G Full-Scene  
Multi-Dimensional Service  
SUN Tao, LU Lu, LIU Chao

## Enterprise View

**61** Challenges, Innovations and Perspectives Towards 6G  
FANG Min, DUAN Xiangyang, HU Liujuan

**71** 5G Enables the Industry and Helps Industry Transformation  
ZUO Luo, CHEN Yabin

## Technology Perspective

**78** High Stable Frequency Narrow Linewidth  
Semiconductor Lasers  
CHEN Wei, BAN Dechao, MU Chunyuan

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*82\*zh\*P\* ¥ 20.00\*15000\*13\*2020-06

敬告读者

本刊享有所有发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。



# 5G 核心网技术与挑战专题导读

## 专题策划人



赵慧玲

工业和信息化部通信科技委专职常委、信息通信网络专家组组长，中国通信学会常务理事、信息通信网络技术专业委员会主任委员，中国通信学会北京通信学会副理事长，中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作委员会主席，中国电信科技委常委兼核心网组负责人，SDN、NFV、AI产业联盟技术委员会副主任，网络 5.0 产业联盟技术委员会副主任；曾获国家及省部级多个科技进步奖项；发表论文 100 余篇，出版技术专著 12 部。

5G 作为新一代通信技术发展的主要方向之一，是全球技术和产业竞争的战略高地，亦是引领科技创新、重塑传统产业模式、发展新经济的关键动力之一。5G 网络领先是实现中国 5G 战略的基石，5G 核心网独立组网（SA）方式采用有别于传统通信的新型服务化架构（SBA），全面云化的技术方式和网络切片、边缘计算等灵活的技术功能为垂直行业 and 广大用户提供了更加丰富的服务能力；但 5G 核心网 SA 的商业部署也面临诸多技术挑战。5G 核心网的云化架构要求通信基础设施进行云化变革，这是新型信息通信基础设施发展的挑战。此外，网络切片的技术复杂度和智慧运营也面临极大的挑战。随着 5G SA 商用建设的开展，作为其核心能力之一的移动边缘计算（MEC）将启动商业部署和运营。MEC 作为 IT 和 CT 的融合平台，普遍被认为是云战略的重要优势之一，MEC 与中心云的协同也成为热议话题。本期专题及专家论坛以 5G 核心网为主题，涵盖其标准进展、关键技术及应用、网络演进及规划、发展建设策略、MEC 云边协同、网络切片智慧运营、IPv6 技术路线和主要技术挑战等业界关注的关键问题，组织了来自运营商、厂家和设计院的 10 篇文章，期望对读者有所帮助。

在《5G 核心网的部署问题与建议》一文中，作者从运营商的视角分析了基于对 5G 核心网的 SBA、网络切片、MEC 和用户面云化等关键技术和产业成熟度，提出了当前应用这些技术存在的问题、局限和挑战。针对 2020 年 5G 核心网的商业部署，作者还特别给出了其所面临的技术应对策略

和建议，这对 5G 核心网的发展有很好的参考价值。

在《5G 核心网商用关键技术与挑战》一文中，作者从关键需求分析入手，论述了 5G 核心网商业部署的 5 大关键技术挑战。针对 5G 核心网的长期演进，作者还指出差异化需求、安全可靠和 ToB/ToC 网络建设模式将是需要解决的关键问题，并深入分析了相关的技术点，这对 5G 核心网的建设部署有重要的参考意义。

在《5G 核心网规划建设的挑战及策略》一文中，作者从运营商的视角针对 5G 网络规划中的关键策略问题进行了论述，包括国际漫游策略、核心网数据面建设的融合策略、5G 核心网网络云化建设策略和 5G SA 核心网控制面与用户面间 N4 接口开放策略等。这些网络规划建设策略分析和建议对 5G 核心网的建设部署有重要的指导意义。

在《5G 核心网技术演进及挑战》一文中，通过对移动核心网技术演进的回顾，作者分析了 5G 架构和关键技术的演进，阐述了 5G 核心网标准不同版本的技术功能增强，分析了云原生及软件技术的能力提升、网络自动化和智能化的挑战。同时，作者还指出了运营商在 5G 应用和服务创新、网络成本以及自主可控等方面的各种挑战，强调不断完善、提升网络云化、开放化、自动化和智能化能力，并通过提高自主研发能力进而对网络自主掌控，才能最终实现 5G 商业愿景。

在《MEC 的云边协同分析》一文中，作者在业界云边协同应用场景和云边协同通用参考框架基础上从运营商的视角提出 MEC 云边协同参考架构，分析了狭义 MEC 与广义 MEC 的云边协同不同点，分析了 MEC 边缘网络服务、边缘运营管理、云边平台服务和云边业务应用 4 大类的协同，为

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003001

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200624.0847.002.html>

网络出版日期: 2020-06-24

收稿日期: 2020-05-20

运营商的 5G MEC 云边协同的发展提供了参考意见。

在《硬件加速在核心网转发面应用的思考与实践》一文中，作者从运营商的视角描述了 5G 核心网用户面的需求及性能要求，认为如何改善相关性能是业界关注的热点问题。作者指出，随着网络带宽增长势头加剧，计算处理能力的短板逐渐凸显，急需一种技术方案来弥补该短板。在 5G 核心网面用户面功能（UPF）上体现为：网卡带宽需求远超过当前主流双路服务器的 CPU 计算能力。通过技术验证，作者给出了一种有效的解决方案：通过现场可编程门阵列（FPGA）智能网卡实现报文卸载，可有效降低 CPU 负荷实现再平衡，从而降低了每吉比特流量的设备成本。同时，FPGA 智能网卡的灵活性也可保证加速硬件资源池的通用性。这对 5G 核心网的部署有重要的参考价值。

在《ENI 辅助的 5G 网络切片智慧运营》一文中，作者介绍了 ETSI 网络人工智能标准工作组（ENI）的网络切片智慧运营标准化进展。网络切片是 5G 网络的核心特征之一，5G 网络切片智慧运营是 ENI 的重要应用场景，也是 ENI 的重点概念验证方向。作者介绍了利用 ENI 系统辅助完成 5G 网络端到端切片的创建、监控、编排管理等一系列生命周期管理操作，及两个相关概念验证项目的完成情况，阐述了 ENI 系统辅助的端到端 5G 网络切片管理框架。作者指出实现基于人工智能的闭环自动化控制，可以确保切片的快速开通、网络资源的高效利用和 SLA 保证。文章对 5G 网络切片智慧运营有很好的参考价值。

在《5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨》一文中，针对 5G 网络引入 IPv6 的问题，作者介绍了 IPv6 单栈下 5G 的技术、

组网、映射和溯源技术方案，指出 5G IPv6 单栈化将是中国 IPv6 演进的一次技术创新。相比于传统的双栈技术，新的技术方案不仅解决了终端地址不足的问题，也有利于降低网络维护的成本，符合网络的发展趋势。对于中国甚至全球来说，是互联网面向纯 IPv6 网络演进的重要一步。作者还给出了运营级网络选择演进路线的策略建议，为 5G 运营商的 IP 网络演进方案的选择提供了参考意见。

在《5G 核心网创新技术研究及应用探索》一文，作者深入分析行业需求，指出传统网络难以满足新需求的痛点，然后剖析了 5G 核心网的创新元素，包括多维度网络切片、用户面软硬件加速、MEC 与 5G 结合、运维自动化和行业多样化使能等技术及应用分析，并论述了 5G 在工业、教育、医疗、电力和车联网等方面的应用，有很好的参考价值。

在“专家论坛”栏目的文章《网络融合深化使能 5G 全场景多维度服务》中，作者以网络融合为主线，从应用场景需求入手，分析了 5G 架构的演进，并提出了网络架构深化融合促进 5G 服务能力扩展的观点，进一步从固定移动融合、天地一体化融合、IT/OT 融合几个维度，分析了 5G 架构融合设计的趋势，也指出了 5G 面向 R17 的关键演进方向，对 5G 网络的发展有指导意义。

这些文章汇聚了各位作者的研究成果和经验，希望能给读者带来有益的收获与参考。在此，对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢！

赵慧玲

2020 年 5 月 20 日



# 5G 核心网的部署问题与建议

## Deployment Issues and Suggestions of 5G Core Network

聂衡 / NIE Heng<sup>1</sup>, 赵慧玲 / ZHAO Huiling<sup>2</sup>, 毛聪杰 / MAO Congjie<sup>1</sup>

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209;  
2. 工业和信息化部通信科技委, 北京 100035)

(1. China Telecom Corporation Limited Research Institute, Beijing 102209, China;  
2. Communications Science and Technology Commission of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Beijing 100035, China)

**摘要:** 对 5G 核心网的服务化架构、网络切片、移动边缘计算 (MEC)、用户面云化等关键技术和产业成熟度进行了深入分析, 提出当前应用这些技术存在的问题、局限和挑战。在 5G 商用部署的时间节点上, 给出了以上这些技术的具体应对策略和建议。

**关键词:** 服务化架构; 网络切片; 移动边缘计算; 用户面云化

**Abstract:** Some key technologies and industrial maturity of 5G core network are analyzed, including the service architecture, network slicing, mobile edge computing (MEC), user plan virtualization. Some issues, limitations and challenges of the current usage of these technologies are also raised. Some specific countermeasures and suggestions of these techniques are given when developing the 5G commercial network.

**Keywords:** service-based architecture; network slicing; mobile edge computing; user plan virtualization

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200618.0937.002.html>

网络出版日期: 2020-06-18

收稿日期: 2020-04-02

目前, 国际标准组织已经基本完成 5G 核心网标准的制定, 可以满足 5G 3 大基础场景之一的增强移动宽带 (eMBB)<sup>[1]</sup> 的需求。5G 独立组网 (SA) 的核心网采用了与传统移动网络不同的全新架构和技术, 开启了传统电信网络向 IT 全面重构的第一步, 并且它与行业深度融合满足垂直行业终端互联的多样化需求<sup>[2]</sup>。相比于非独立组网 (NSA), SA 网络能够带来众多的 5G 网络新业务和特性, 因此中国运营商目前将 SA 网络作为当前的网络建设目标。本文中, 我们通过研究和分析 5G SA 核心网的服务化架构、网络切片、移动边缘计算、用户面云化等关键技

术, 提出了当前部署 5G 核心网中存在的问题、挑战, 以及应对和发展建议。

### 1 服务化架构

5G SA 核心网顺应了未来电信网络向着云化、软件化演进的趋势, 参考了 IT 领域的软件架构建设经验 (采用微服务进行组织), 也将服务化架构 (SBA) 作为 5G 网络的基础架构来设计。5G 核心网的 SBA 将网络功能 (NF) 进一步拆分成若干个自包含、自管理、可重用的 NF 服务。这些 NF 相互之间解耦, 具备独立升级、独立弹性的能力, 具备标准接口与其他网络功能服务互通的能力, 并根据不同

的需求通过编排工具进行编排和实例化部署。考虑到 5G 标准的完成进度、技术成熟度等因素, 5G 核心网的 SBA 目前完成的是控制面的服务化; 而用户面的服务化是未来的建设目标, 目前尚未完成。图 1 为非漫游情况下 5G 核心网的控制面采用的 SBA<sup>[3]</sup>。

可以看到, 除了无线接入网 (RAN) 和核心网用户面的用户面功能 (UPF) 之外, 所有的控制面 NF 都采用了 SBA, 这些 NF 对外提供一种或多种服务。

#### 1.1 服务注册和发现

在 5G 核心网的 SBA 下, 服务

通过生产者与消费者间的消息交互来提供。交互模式主要简化为两种：Request-Response、Subscribe-Notify，从而支持 NF 间按照服务化接口交互。5G 核心网的各种服务采用服务自动注册和发现机制，实现了各 NF 在 5G 核心网中的即插即用、自动化组网；同一服务可以被多种 NF 调用，提升服务的重用性、简化业务流程设计。NF 通过服务化接口，将自身的能力作为一种服务暴露到网络中，并被其他 NF 复用；NF 通过服务化接口的发现流程，获取拥有所需 NF 服务的其他 NF 实例。这种注册和发现通过 5G 核心网引入的新型网络功能——网络资源功能（NRF）来实现的，此时 NRF 作为生产者来提供网络功能注册服务。NRF 接收其他 NF 发来的服务注册信息，维护 NF 实例的相关信息和提供的服务信息；NRF 接收其他 NF 发来的 NF 发现请求，返回对应的 NF 实例信息。5G 核心网的服务注册、发现、通信机制具体如图 2 所示。

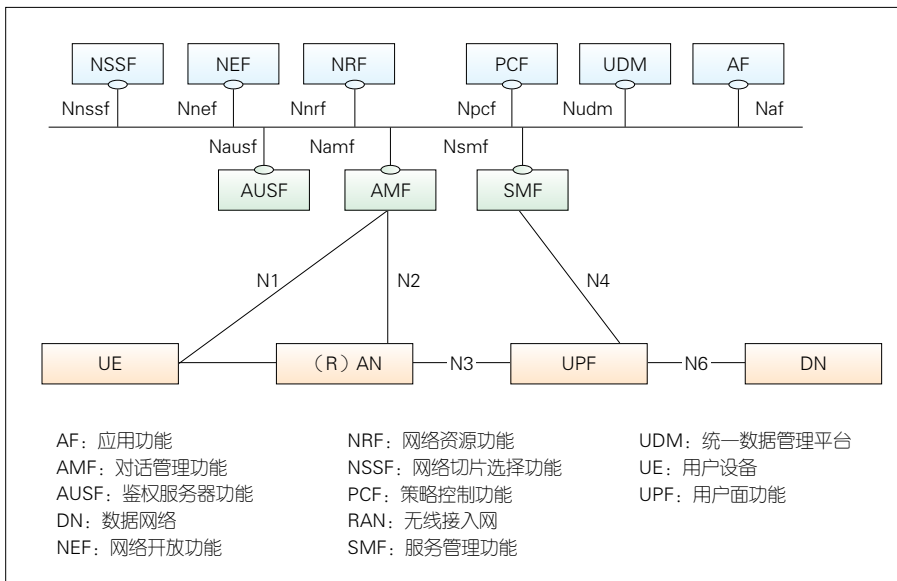
当 NF-B 作为新部署的网元上线时，会将自身支持的两个网络功能中的服务（NFS-B1、NFS-B2）和地址注册到 NRF 中。NRF 维护各种 NF 实例的相关信息和提供的服务信息。当 NF-A 需要使用 NF-B 的某个服务时，NF-A 向 NRF 发出 NF-B 的服务发现请求，获取拥有所需服务的 NF 实例，然后 NRF 向 NF-A 返回所请求服务的 NF 实例对应的地址（包括 NF-B 在内），随后 NF-A 向这个地址（NF-B）发起请求相应的服务。对于 Request-Response 模式，NF-A 请求的服务内容可能是进行某种操作或提供一些信息，NF-B 根据 NF-A 发送的请求内容，返回相应的服务结果。对于 Subscribe-Notify 模式，NF-A 向 NF-B 订阅 NF 服务，订阅的信息可以是按时间周期更新的信息或特定事件触发的通知（例

如请求的信息发生更改、达到了阈值等），NF-B 对订阅了该服务的 NF-A 发送通知并返回结果。

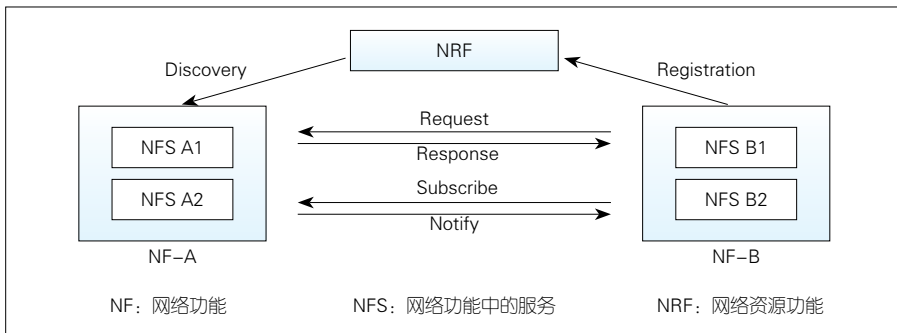
这种服务的自动注册和发现机制，在大范围组网时会面临挑战。例如，中国运营商习惯于按省来组织移动核

心网，此时需要省内 NRF 来实现各个 5G 核心网网元的自动组网；同时又采用更高层次面的全国 NRF 来实现跨省的 5G 核心网网元自动组网，如图 3 所示。

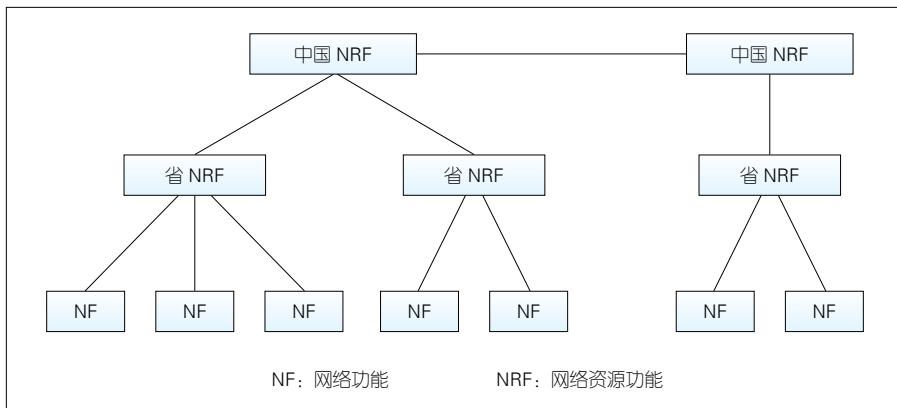
省 NRF 向所属的全国 NRF 注册 NF 数据，而全国 NRF 会有多个省的



▲图 1 5G 独立组网核心网服务化架构



▲图 2 5G 核心网的服务注册、发现、通信机制



▲图 3 NRF 的组网



NF 数据,且这些数据量很大;因此,需要减轻全国 NRF 负荷,但如何对数据进行聚合还不成熟。在同一个全国 NRF 上,多个省的数据间可能存在冲突和重复,但如何处理该情况目前也没有规范或经验。在有多个全国 NRF 的情况下,各个 NRF 之间如何自动发现,国际上还没有制定符合 SBA 理念的标准规范。目前的全国 NRF 之间是同级架构,不存在服务注册关系。

针对以上挑战,一些运营商通过手动配置来解决。例如,对于省 NRF 向全国 NRF 注册 NF 数据,可以手动在全国 NRF 配置所辖省 NRF 的 NF 注册信息,并进行数据聚合。对于全国 NRF 之间的发现,可以手动配置全国 NRF 间的路由,并基于 NF 网元的省编号、用户号码段等信息来进行发现。

## 1.2 服务化接口

5G 核心网采用统一的服务化接口协议。在设计接口协议时,考虑了适应 IT 化、虚拟化、微服务化的需求,目前采用了表 1 所示的协议栈。

5G 服务化接口协议栈在传输层采用了传输控制协议(TCP),在应用层采用 HTTP/2.0<sup>[4]</sup>,在序列化协议方面采用了 JSON,接口描述语言采用 Open 应用程序编程接口(API)3.0(API 的设计方式采用 RESTful)。对于传输层,目前 3GPP 正在研究用户数据报协议(UDP)、快速 UDP 网络连接(QUIC)。如果需要保证 5G 网元间服务化接口通信的安全,可以通过网

▼表 1 5G 服务化接口协议栈

协议分层功能	协议选择
API 设计方式	RESTful 为主
接口描述语言	OpenAPI 3.0
序列化协议	JSON
应用层	HTTP/2.0
传输层	TCP

API: 应用程序编程接口 TCP: 传输控制协议  
RESTful: 一种网络应用程序的设计和开发方式

元开启传输层的安全协议——安全传输层协议(TLS)来实现。作为对比,4G 网络的核心分组网演进(EPC)的控制面协议采用了传统的电信网络协议——Diameter 和通用无线分组业务隧道控制协议(GTP-C)。

可以看出,服务化接口的复杂会给 5G 网络的运行指标带来一定的挑战。5G 核心网采用 SBA 的接口协议栈。与传统移动核心网的协议相比,5G 核心网虽然带来了更多的灵活性,但因为更加复杂会导致性能下降。用同样的硬件来实现的话,处理相同的信令任务,服务化接口的处理能力相对传统协议有所下降,协议处理时延也有所增加,这在各种测试和实验中已经有所体现。另外,SBA 的网络变得复杂,例如,接口增多、信令增多。接口和信令的增多,再加上协议处理时延的增加,导致了 5G 相对于 4G 的任务处理时延增加。例如,从控制面看,5G 网络下的 N2 切换就比 4G 网络下的 S1 切换时延要长。毕竟服务化架构的 5G 核心网还是新生事物,这些处理性能和时延的问题带来的运营指标下降是暂时的。从长远来看,可以通过优化软件结构和代码、不断升级的云资源池的服务器性能来解决。

## 2 网络切片

网络切片是 5G 网络的重要使能技术,实现了基于业务场景按需来定制网络。网络切片的关键特征表现为:端到端、可编排、可隔离、差异化的服务等级协议(SLA)、功能模块化。不同的网络切片之间可共享资源也可以相互隔离。网络切片是端到端,涉及核心网络(控制平面和用户平面)、无线接入网、IP 承载网和传送网等多个子域,需要多领域的协同配合。从目前来看,核心网切片的标准和设备相对比较成熟,5G 核心网支持切片的

选择功能、切片的通信流程。无线网切片由于具有一定的技术难度,如何根据切片标识进行逻辑或物理资源的切分及服务质量(QoS)调度,目前不同设备厂家的进展和实现各有不同。承载网切片目前相对独立发展,在与移动网之间跨专业的联动/打通方面还需要进一步推进。总体上看,实现网络端到端切片在技术上还有许多挑战,需要做到各子域间切片的协同和对接,复杂度相当高。对这个问题,目前产业界也在逐步解决,CCSA 已经成立了相关特设工作组来协调运营商、厂商等共同推进这一工作。

在 5G 网络中,通过单网络切片选择辅助信息(S-NSSAI)来区分不同的切片,且终端、无线网、核心网都需要用到这个标识。S-NSSAI 的编码由切片服务类型(SST)和切片微分器(SD)两部分组合而成。SST 标明切片的业务类型。目前 3GPP 定义了 4 大类业务,分别为 eMBB、超可靠低时延通信(URLLC)、海量机器类通信(mMTC)、车用无线通信技术(V2X),SD 标明大类业务下具体的切片业务,这个可以由运营商自己基于切片业务的规划来进行编码管理。5G 终端是切片的发起方,可以基于不同的应用(APP)来选择对应的切片,然后在建立承载会话的过程中将 S-NSSAI 发给无线网、核心网,再由网络来选择对应的网络切片实例,进行网络资源的分配。

根据 3GPP 的设计,终端可以通过网络切片选择策略(NSSP)来选择切片,NSSP 可以由网络下发给终端或配置在终端上。NSSP 的信息结构示意图如表 2 所示,包含了 APP 应用信息、终端操作系统(OS)的信息、切片信息等。

当前智能终端的能力不够,对网络提供多切片会带来挑战。由于智能

▼表 2 网络切片选择策略的信息结构示意图

规则	Appld	S-NSSAI
默认	-	S-NSSAI1
规则 1	OsId1 OsAppld1	S-NSSAI2
规则 2	OsId2 OsAppld2	S-NSSAI3
规则 N	OsIdN OsAppldN	S-NSSAIN

S-NSSAI: 网络切片选择辅助信息 Appld: 应用标识

终端和 APP 生态的复杂性，终端 NSSP 相关的标准和产业化还做得不完善。目前的智能终端无法基于不同应用选择不同的切片，只能对所有应用都选择同一个切片，这就限制了企业对企业对客户（B2B2C）类切片业务的开展（毕竟这类业务主要是基于智能终端的）。对于那些只提供单一业务的政企终端（2B 类应用，例如视频监控），则没有限制，网络可以选择终端请求的对应切片。针对上面智能终端的问题，业界正在从标准和产业的角度进行积极推进。

为了在未来能够真正发挥出 5G 网络切片的价值，需要实现切片管理域对切片的编排和管理。图 4 是切片管理域的示意图，可以看到切片管理

域与切片网络（业务域）之间的关系。

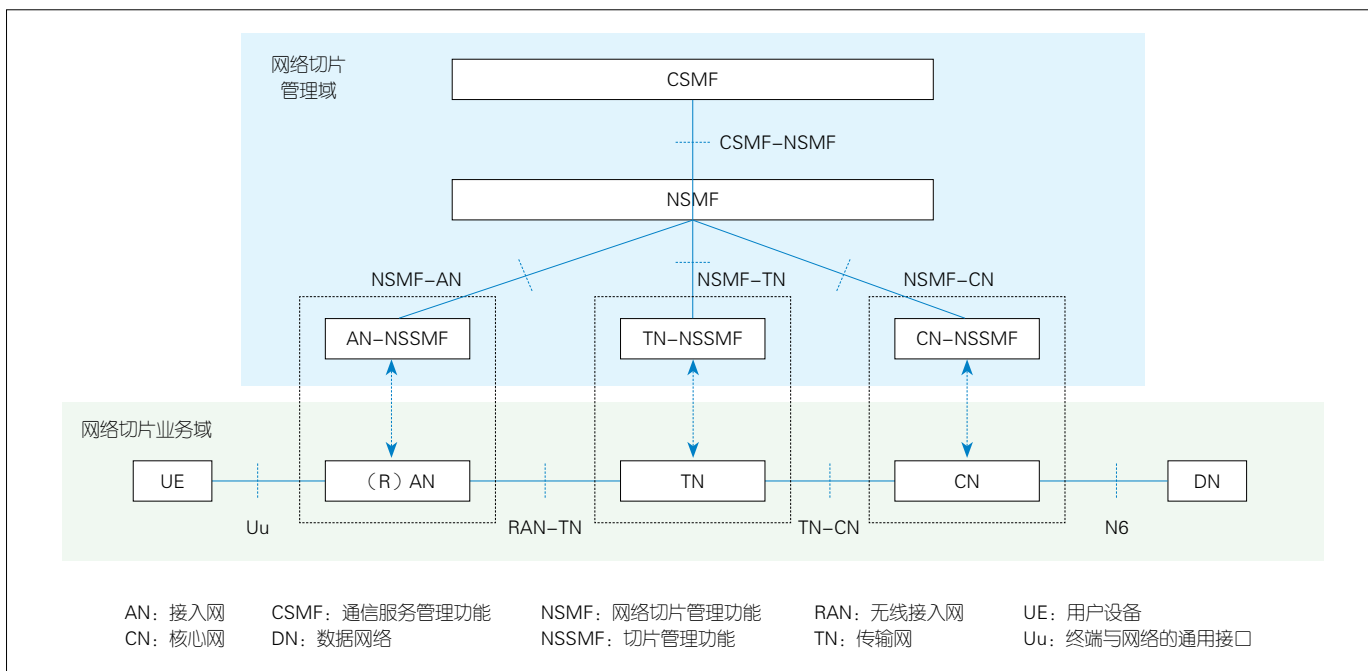
网络切片管理域由如下功能组成：通信服务管理功能（CSMF）、网络切片管理功能（NSMF）、网络子切片管理功能（NSSMF），具体包括天线接入网（RAN）子切片管理功能（AN-NSSMF）、传输网子切片管理功能（TN-NSSMF）和核心网子切片管理功能（CN-NSSMF）。对于云化的核心网，CN-NSSMF 需要通过网络功能虚拟化编排器（NFVO）来实现核心网切片中各个 NF 所需资源的创建。图 4 中切片管理域里面的各个功能实体只是从单纯的切片管理角度来阐述。在运营商实际的网络中，在很多情况下这些切片管理功能并不会独立存在，而是分散并嵌入到运营商自己的运营支撑系统（OSS）、业务支撑系统（BSS）中，并且不同的运营商的具体方案也不同，需要运营商的运维、IT、政企、网络部门深度参与才能将切片管理域整合进这些系统中。这对运营商的系统集成能力、研发能力、运营和维护能力将是挑战，运营商应该尽早着手

来发现问题解决问题，提自身升能力。

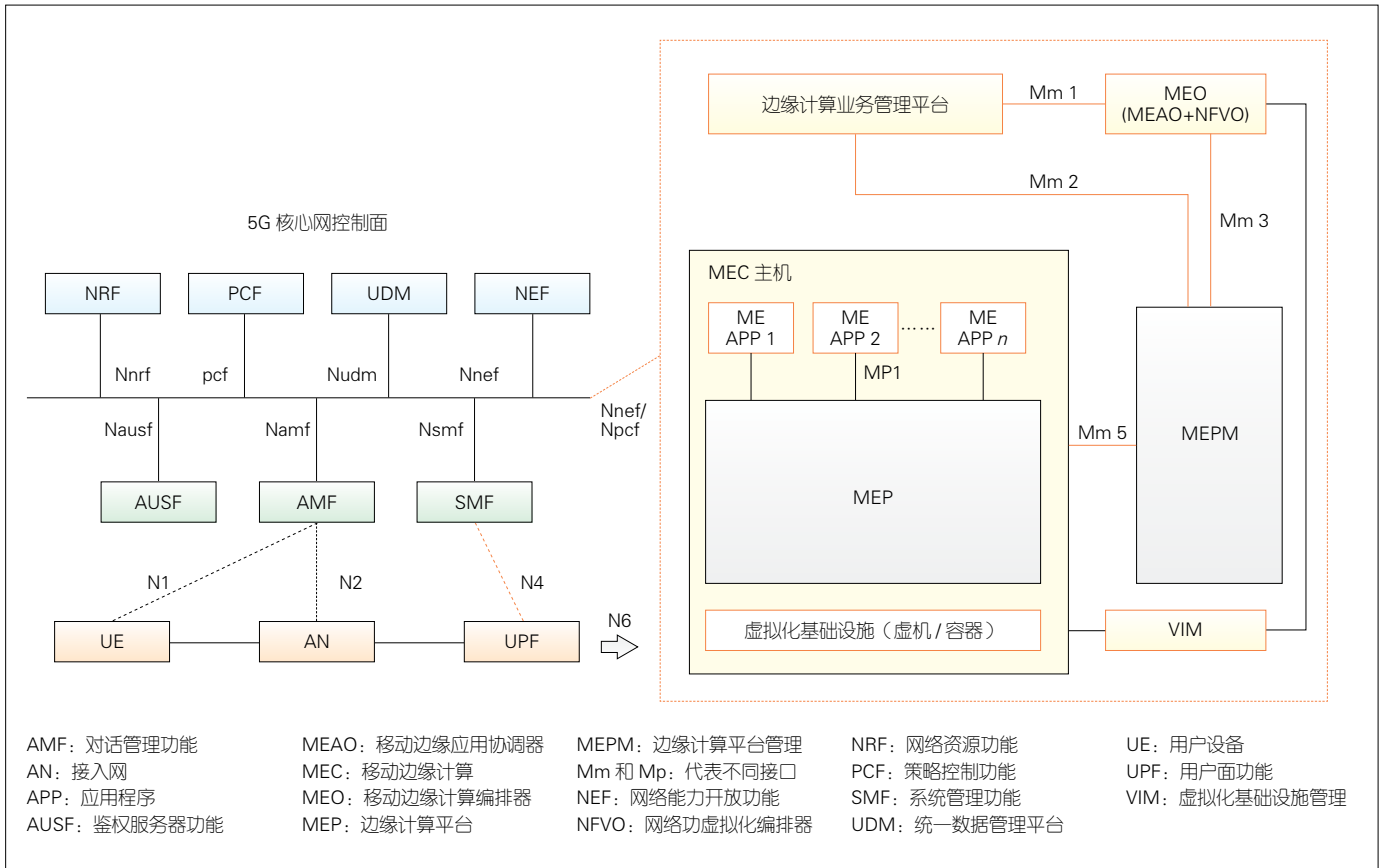
### 3 移动边缘计算

传统集中式云计算将业务处理数据回传至云数据中心，采用集中式数据存储，并利用超强的计算能力来集中式解决计算和存储问题；但在面对大带宽、大连接、低时延的 5G 应用场景时有局限性。移动边缘计算（MEC）在移动网边缘提供 IT 服务环境和云计算能力，强调靠近移动用户，以减少网络操作和服务交付的时延，提升用户体验。由于 4G 核心网对 MEC 支持的能力不足，5G 核心网在架构设计时就考虑了 MEC 的需求，在网络层面和能力开放层面都支持边缘计算。在网络层面，5G 核心网支持多种灵活的本地分流机制、移动性、计费 and QoS，以及合法监听。在能力开放层面，5G 核心网支持 APP 路由引导，支持对网络及用户的信息获取和控制。5G MEC 端到端系统架构如图 5 所示。

图 5 右侧的 MEC 系统在 5G 核心网中担任着“应用功能（AF）+ 数据



▲图 4 切片管理域



▲图 5 5G 移动边缘计算端到端系统架构

网络 (DN)”的角色。MEC 系统可以以非可信 AF 的角色通过“NEF 到策略控制功能 (PCF) 到系统管理功能 (SMF)”这个路径来影响用户面策略，或以可信 AF 的角色通过“PCF 到 SMF”这个路径来影响用户面策略；作为 AF 的一种特殊形式，MEC 系统可以与 5G 核心网的 NEF/PCF 进行更多的交互，并可以调用其他的 5G 核心网开放能力。MEC 系统和 UPF 之间为标准的 N6 连接，5G 核心网控制着 UPF 并将指定的 MEC 业务分流到 MEC 系统中。

目前，业界对边缘 UPF 与 MEC 系统间的关系还并不完全清晰，这会对边缘技术的规模商用构成挑战。从 3GPP 标准的系统架构上看，5G 核心网中支持 MEC 的边缘 UPF 与 MEC 系统之间是松耦合关系，这样可以实现

网络与平台的安全隔离，适应更多应用场景。在当前 SMF 与 UPF 之间的 N4 接口尚未完全开放的情况下，可以按照业务的需求直接部署与 5G 核心网 SMF 相同厂商的边缘 UPF。从 MEC 系统实际部署和资源利用效率来看，考虑到部署在边缘的系统可能存在各种资源受限的情况，在一些情况下边缘 UPF 与 MEC 系统间采用紧耦合会更好。这样一来，UPF 和 MEC 系统可以统一集成，效率相对较高；但又会面临在 MEC 系统厂商与 5G 核心网厂商不同的情况下，边缘 UPF 与 5G 核心网 SMF 之间 N4 接口互通的问题。对于这个问题，目前中国的运营商发起了 N4 接口开放合作计划，规范了 N4 接口的基础服务和部分增值服务，由此来促进边缘 UPF 与 SMF 的解耦。由于边缘 UPF 比核心的 UPF 简单，并且对

5G 核心网主流厂家的利益触动不大，因此，N4 接口开放合作的推动难度会小很多。

#### 4 用户面云化

在电信设备产业云化发展的趋势下，5G 核心网 UPF 网元采用云化的部署，具备快速部署、位置动态调整、新业务快速使能等能力。增强现实 (AR) / 虚拟现实 (VR)、4K/8K 高清视频、3D 游戏等 eMBB 应用将会进一步提升用户流量，因此 5G 移动用户流量将会增速迅猛。UPF 需要提供用户流量的高速处理，需要资源池满足转发性能及计算能力。例如，GTP、IP 转发等对吞吐量要求高；新业务的增多导致深度报文分析 (DPI) 逻辑复杂、协议多样，对计算能力的要求也变高；QoS 的处理对内存消耗

较大。

目前, 5G 核心网用户面 UPF 的设备形态包括专用设备、通用服务器。专用设备的转发效率最好, 能够以线速转发; 但无法实现分层解耦, 无法被 NFVI 统一纳管, 扩容能力不灵活。通用服务器包括软件加速方案和硬件加速方案。软件加速方案的转发效率不高, 目前已经无法满足大流量、低延迟的转发需求; 但其扩展性好, 可通过资源池管理系统并进行统一纳管。硬件加速方案的转发效率可接近线速, 但各厂商网卡类型、业务卸载方式不一, 资源池难以纳管, 这与硬件加速当前的标准化程度还不够、产业化成熟度不够高有关。

因此, 当前 UPF 的部署面临着是否需要云化、如何云化的挑战。UPF 云化部署的方案, 应该结合转发性能、建设成本、部署环境、成熟度进行综合考量。目前主流 5G 核心网厂家的大容量中心 UPF 以硬件加速的通用服务器为主, 并采用数据平面开发套件 (DPDK) 和单根 IO 虚拟化技术 (SR-IOV) 加速技术。但实际上, 云化部署并没有那么成熟, 需要由厂商来进行集成。只有完成硬件、虚拟化基础设施管理 (VIM)、VNF 的集成部署, 才能保证高转发性能, 从而提升对接、运维效率。对于边缘 UPF,

转发性能要求不高, 且需要按需下沉, 灵活和快速部署, 灵活扩展; 因此, 可以考虑采用小型化、低成本的通用服务器虚拟化方案。

## 5 结束语

当前服务化架构 5G 核心网的级联组网, 可以通过 NRF 的手动配置来进行; 接口性能问题可以通过优化软件代码、不断升级的云资源池的服务器性能来逐步解决。对于网络切片的问题, 需要从标准和产业角度提升终端的多切片能力; 切片管理则需要运营商提升系统集成能力、研发能力。边缘计算需要综合考虑边缘 UPF 与 MEC 系统的解耦, 并且推动 N4 接口的开放合作。根据当前的技术发展水平, 中心的用户面云化建议由厂商来进行集成, 边缘用户面可以考虑通用服务器虚拟化方案。

## 参考文献

- [1] ITU-R. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[R]. 2015
- [2] 聂衡, 赵慧玲, 毛聪杰. 5G 核心网关键技术研究[J]. 移动通信网络, 2019,(1):2
- [3] 3GPP. System architecture for the 5G system; stage 2 (Release 15):3GPP TS 23.501 V15.9.0[S]. 2020
- [4] 3GPP. Technical realization of service based

architecture; stage 3 (Release 15):3GPP TS 29.500 V15.5.0[S]. 2020

## 作者简介



聂衡, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师; 研究方向为移动通信。



赵慧玲, 工业和信息化部通信科技委专职常委、信息通信网络专家组组长, 中国通信学会常务理事、信息通信网络技术专业委员会主任委员, 中国通信学会北京通信学会副理事长, 中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作委员会主席, 中国电信科技委常委兼核心网组负责人, SDN、NFV、AI 产业联盟技术委员会副主任, 网络 5.0 产业联盟技术委员会副主任; 曾获国家及省部级多个科技进步奖项; 发表论文 100 余篇, 出版技术专著 12 部。



毛聪杰, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师; 研究方向为移动通信。



# 5G 核心网商用 关键技术与挑战

## Key Technologies and Challenges of Commercial 5G Core Network

王卫斌 /WANG Weibin, 陆光辉 /LU Guanghui, 陈新宇 /CHEN Xinyu

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

**摘要:** 针对 5G 核心网的快速商用部署和自动化运维挑战, 探讨极简 5G 核心网、虚拟化解耦、网络切片、边缘计算技术和自动化运维等创新技术在 5G 核心网商用的方案; 针对演进阶段的差异化需求和安全可靠挑战, 探讨行业使能、控制面和用户面可靠性增强等创新技术的应用。通过这些关键技术研究和使用, 提出基于意图的精准核心网的理念来满足 5G 网络多波次的商用需求。

**关键词:** 独立组网; 非独立组网; 极简 5G 核心网; 虚拟化; 网络切片; 边缘计算; 人工智能; 时间敏感网络

**Abstract:** In response to the challenges of rapid commercial deployment and automated operation and maintenance of 5G core network, the solutions for commercial use of innovative technologies such as simplified 5G core network, virtualization decoupling, network slicing, edge computing and automated operation and maintenance are discussed. To meet differentiated requirements and security and reliability challenges in the evolution phase, the application of innovative technologies such as industry enabling and user plane reliability enhancement is analyzed. Based on the research and application of these key technologies, the intention-based precise core network concept is proposed to meet the commercial requirements of 5G networks.

**Keywords:** standalone; non-standalone; simplified 5G core network; virtualization; network slicing; edge computing; artificial intelligence; time sensitive network

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003003

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.1707.008.html>

网络出版日期: 2020-06-23

收稿日期: 2020-04-09

## 1 5G 核心网的现状和需求

### 1.1 标准现状

针对 5G 标准版本, 3GPP 定义的第 1 个版本是 R15, 该版本主要聚焦增强移动宽带 (eMBB) 场景, 其功能已于 2018 年 6 月冻结。目前 R15 架构稳定, 功能、流程以及业务能力完备, 已完全满足 eMBB 商用要求, 为业界主流运营商 5G 网络商用的首选版

本。第 2 个 5G 版本是 R16, 该版本是在 R15 的基础上进行了多方面的增强, 包括架构演进、多接入和智能化等, 同时聚焦超可靠低时延通信 (URLLC) 场景, 增加了对垂直行业功能需求的支持。该版本计划在 2020 第 2 季度冻结, 目前处于完善和改错阶段。第 3 个 5G 标准版本是 R17, 该版本聚焦海量机器类通信 (mMTC) 场景, 目前正在方案研究阶段, 计划于 2021 第 3 季

度冻结<sup>[1]</sup>。

针对 5G 部署模式, 3GPP 在 R15 中定义了 5 种模式, 即 Option 2—5 和 Option 7<sup>[2]</sup>, 运营商可以综合自身发展需求以及产业链成熟度等条件选择其中一种模式。目前业界主流运营商选择 Option 2 或 Option 3。

1) Option 2 部署模式 (独立组网): 类似于 2G/3G/4G, 5G 与前代系统的架构相互独立, 采用全新核心

网。5G 基站直接与 5G 核心网相连，终端以单连接方式接入 5G 或 4G。

2) Option 3 部署模式（非独立组网）：5G 基站依附于 4G 基站的网络架构，无法独立组网。利用旧的 4G 核心网，5G 基站作为辅助基站接入到 4G 基站，终端采用双连接方式同时接入到 5G 和 4G。

## 1.2 商用现状

5G 非独立组网（NSA）部署模式是基于传统 4G 核心网来构建 5G 网络，只需要将 5G 基站作为辅助基站接入到 4G 基站，即可实现 5G 部署。该模式商用成本低、建设速度快，对现网的影响较小；因此，在 2020 年之前，5G NSA 方案是所有追求 5G 商用时间领先的运营商的首选。目前，全球已宣称商用的 5G 网络采用的均为该方案。全球移动通信系统协会（GSMA）研究报告<sup>[1]</sup>指出：截至 2019 第 4 季度，全球已有 53 个运营商、28 个市场发布 5G NSA 商用网络，用户连接数已达 1 000 万；预计到 2020 第 4 季度，全球将有 178 个运营商、61 个市场发布 5G 商用网络，用户连接数将达到 3 900 万。

2019 年被称为 5G 元年或 5G NSA 元年，在这个阶段，5G 发展追求的是“快速”；2020 年被称为 5G 独立组网（SA）元年，在这个阶段，5G 发展追求的是“质量”。2020 年是全球 5G 商用部署的关键一年，5G SA 尤其是新核心网的创新技术、原生行业应用支撑能力将掀起一场颠覆式的产业变革，会给 5G 生态的参与者乃至每一个行业，带来一场全新的革命。

## 1.3 关键需求

5G 网络肩负应对 OTT（指互联网公司越过运营商）挑战、拓展垂直行业和增加业务收入的使命，需要具备快速定制能力、基于切片的运营能力、

高度自动化的智能运维能力。基于传统 4G 核心网（EPC）组网架构建设的 5G NSA 网络，无法满足上述使命。不同于 5G NSA，SA 是一个全新架构的 5G 网络，采用全新的 5G 核心网和独立组网的 5G 基站，可以平滑演进到 3GPP 最新版本。同时 SA 架构也是 5G 目标网络架构，具备先进性。该架构不仅满足普通用户的需求，也能满足万物互联的需求。先进的网络架构不仅可以避免重复投资和网络频繁改造，也有助于运营商取得领先的市场地位，并快速切入垂直行业的新蓝海市场。因此，采用 5G 核心网的组网架构，非常符合全球最先进运营商的战略创新目标和 5G 商用总体需求。

5G 核心网采用了全新技术，商用成本高，建设速度慢，按照常规技术和方法无法满足运营商快速商用的迫切要求，无法满足千行百业的大带宽、低时延、大连接、高可靠的迫切需求。因此，5G 核心网的关键需求是必须具备快速商用部署能力，提供众多创新技术以满足快速创新的需求。

此外，5G 初期主要是 eMBB 应用场景，典型的新业务如云增强现实（AR）/虚拟现实（VR）、云游戏、视频直播等沉浸式实时视频业务，都只是 5G 的第 1 波应用。随着 URLLC、mMTC 等应用场景的引入，5G 将迎来第 2 波、第 3 波的应用，催生万物互联的产业变革。5G 核心网的另一个关键需求是具备持续平滑演进的能力，以满足 5G 各阶段的万物互联的差异化需求。

## 2 5G 核心网商用关键技术

### 2.1 商用挑战

自从 2018 年 7 月开始，基于 SA 的 5G 核心网就被提上了全球运营商商用部署议程。核心网作为网络的核心

和大脑，其商用技术方案一方面需要遵循 3GPP 协议标准，另一方面需要满足运营商 5G 快速商用的要求。根据网络商用涉及到的网络架构、产品功能、服务质量和运维运营等全方位的要求，5G 核心网面临着 5 个方面的关键挑战。

1) 5G 核心网的网元和接口数量多，同时又采用全新的用户数据和计费架构，技术规范的制定、功能和接口的测试与验证等部署工作量巨大，从而导致其无法快速部署商用；因此，急需减少 5G 核心网网元和接口数量，减少部署工作量来实现 5G 快速部署需求。

2) 5G 核心网基于网络功能虚拟化（NFV）技术<sup>[4]</sup>，可实现网元商用部署的资源统一、按需分配。按照组件间解耦与否来组合，NFV 技术有多种方案，而运营商如何选择一个合适的方案来满足 5G 业务的快速部署要求，并能实现资源的最大共享和网络的稳定商用，是其需要面对的问题。

3) 网络切片技术可以在一张物理网络上按需生成多个逻辑网络，来满足不同业务的差异化需求，降低运营商的建网成本。5G 初期，切片管理标准规范还不成熟，跨域、跨厂家互联互通难度大；因此，如何快速商用部署端到端网络切片需要重点考虑。

4) 运营商可以通过边缘计算减轻网络传输负荷，降低设备系统的响应延时，满足行业业务差异化性能和成本需求。随着边缘节点数量的大量增加，如何快速部署，降低部署成本，简化运维，是运营商面临的一个挑战。

5) 5G 网络是一个切片网络，在物理层、链路层、虚拟层、网络层和用户层将会产生多元化的海量数据。5G 核心网须具有自动化网络运维的能力，以自动编排、生成、维护和终止网络业务，提升运维效率，降低运营

商的运维成本。

## 2.2 关键技术

我们可以采用一些关键技术来解决如上所述的挑战，进而满足运营商快速商用部署和创新的需求。

### 2.1.1 极简 5G 核心网技术

极简 5G 核心网主要使用网元融合、功能和接口简化等技术来减少部署工作量和测试验证时间。

1) 网元融合。5G 核心网的部署需要尽可能考虑网元融合方案。该方案一方面可以解决不同接入方式的互操作问题，另一方面可以减少部署工作量和测试验证时间。网元融合主要包括 3 种：

(1) 4G/5G 互操作的融合：支持统一用户数据、策略控制、会话锚点和数据转发锚点；

(2) 多接入类型的融合：支持 2G/3G/4G/5G 网元融合，实现全网业务统一；

(3) 多部署场景的融合：除了支持 Option 2 部署模式，还需要支持 Option 3—5 和 Option 7 的部署模式，实现全部署场景的支持。

2) 功能简化。5G 核心网的新建需要部署融合的统一数据管理平台 (UDM) + 归属签约用户服务器 (HSS)，提供统一的 2G/3G/4G/5G 用户签约数据

集中管理，实现用户不换卡不换号，提升用户体验；但需要将原有 2G/3G/4G 用户迁移至新建的融合 UDM+HSS 中，迁移工程工作量大、风险高。为了避免迁移，可以通过功能简化技术快速接入 5G，即新建独立的 UDM 并内置小功能，通过网络互通功能 (IWF) 和现网 HSS 交互获取签约数据来实现用户不换卡不换号。这样一来，就无须新建融合 UDM+HSS，也无须 2G/3G/4G 用户数据的迁移，便可实现 5G 快速的商用。

3) 接口简化。5G 网络中引入了基于服务化架构的在线 / 离线融合计费系统，与现网的在线 / 离线计费分离架构差别很大。在 5G 建设初期，5G 新计费架构的采用会导致现网计费系统、开通系统改造工程量巨大，改造时间长，无法快速商用 5G。为了避免该问题，可以利用融合的会话管理功能 (SMF) + 分组数据网网关控制面 (PGW-C) 天然支持 4G 计费接口。在 5G 网络中继续延用 4G 计费接口方式，只需要现网的接口增加可以支持 5G 接入类型和位置信息等即可，这样就可以避免现网计费以及开通系统的大规模改造。

### 2.1.2 虚拟化解耦技术

ETSI NFV 架构只定义了各组件间的通信接口或兼容性接口，具体部署方案依赖于运营商的选择。5G 核心网

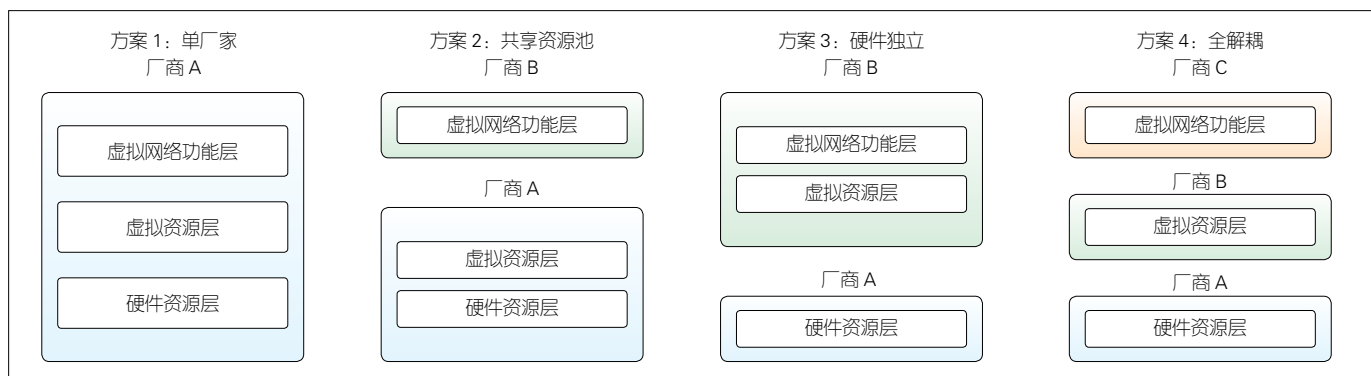
是基于 NFV 构建的，可以根据各组件解耦的开放性不同，将其部署方案分为单厂家、共享资源池、硬件独立、全解耦 4 种，如图 1 所示。这 4 种部署方案的对比分析如表 1 所示。

针对部署方案，目前运营商主要有两种倾向：一部分运营商对成本、成熟度和部署时间有要求，较为倾向于方案 1 和方案 3。另一部分运营商对目标网络、信息与通信技术 (ICT) 融合有要求，较为倾向于方案 4；但考虑到虚拟资源层的成熟度，有可能这部分运营商中还会有一部分先使用方案 3，再演进到方案 4。以上 4 种虚拟化部署方案均满足 5G 核心网商用技术要求，运营商可以综合商用时间要求、测试验证情况等选择其中最合适的一个。

### 2.1.3 网络切片技术

网络切片是 5G 核心网的核心特性，它与传统的服务质量 (QoS)、接入点名称 (APN) / 数据网络名称 (DNN) 的技术差异在于：QoS 只能提供单类用户的性能保障，APN/DNN 只能选择服务接入点，无法区分无线能力；网络切片可以提供端到端的专用网络来保障用户的服务等级协议 (SLA) 要求，满足行业用户差异化的网络需求，更好地适应垂直行业快速创新需求。

目前网络切片标准涉及 6 大行业



▲图 1 5G 核心网的 4 种部署方案

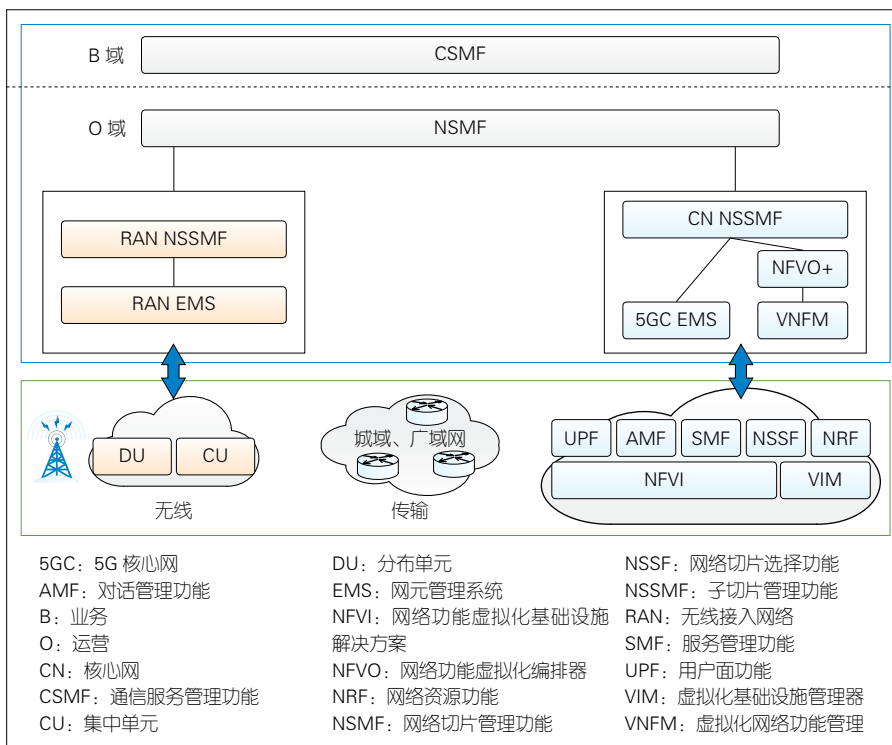
▼表 1 5G 核心网的 4 种部署方案对比

类别	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
耦合程度	有耦合	有少量耦合	有少量耦合	无耦合
接口标准成熟度	成熟	依赖测试验证	成熟	依赖测试验证
集成复杂度	低	高	一般	高
故障定位	容易	难（软 - 软间接口定位问题，难度较大）	容易（软硬件间接口成熟，容易判断是硬件还是软件问题）	难（软 - 软间接口定位问题，难度较大）
责任界面	清晰	相对清晰	相对清晰	不清晰，容易有分歧

组织，但各自分工，协同进展缓慢，存在较大不足，制约了切片端到端的商用。3GPP 只对核心网 + 无线的切片做了定义，在 R15 版本中已发布了满足核心网 + 无线构建 eMBB 切片能力的标准；但切片管理规范尚不完善，且传输网不在 3GPP 工作组范围内。ITU、IETF 定义了传输网的端到端切片标识 / 管理接口等，但与核心网 + 无线的联动机制等规范都未定义；ETSI ZSM 制订了端到端切片管理实现框架和解决方案，目前仅发布了初稿，处于草案状态；TMF 正在研究 3GPP 切片管理架构与 TMF 现有架构的融合，目前也仅发布了初稿，处于架构阶段；GSMA 定义了切片应用场景和通用的切片模板，已发布 8 大场景切片参数和技术要求。

为了尽快部署切片，考虑到 5G 初期行业应用有限，可优先在核心网 + 无线实现端到端切片，如图 2 所示。运营商需要逐步开展基于 5G 核心网 + 无线的网络切片试点部署及验证。初期运营商重点聚焦于典型的 eMBB 切片，例如高清视频、AR/VR、高清游戏等业务，并适当地配合核心网用户面下沉部署，实现部分超低时延业务需求。在该阶段可以将切片与行业应用示范相结合，充分验证 5G 切片对不同场景差异化 SLA 的支撑能力。

随着 5G 切片标准的成熟，端到端网络切片逐步引入传输 / 无线子切片，并在前期构建的编排管理系统基础上，增加切片设计、保障分析、策



▲图 2 端到端网络切片架构

略等功能，具备对端到端切片的全生命周期管理能力。在切片业务实现的同时，需要同步考虑切片的运营模式，包括切片的交付、定价、计费、能力开放等，为网络切片商业化运作积累经验及技术积累。

### 2.1.4 边缘计算技术

传统电信网络采用集中建设的模式，随着业务规模的日益扩大，其网络日益变得臃肿，同时这种中心化网络难以适应新兴业务发展的需要。边缘计算作为 5G 网络的关键技术之一，可以在接入边缘就近部署计算、存储、

分流、大数据分析等功能，实现运营商业务本地化、分布式处理，提升网络数据处理效率，加速网络中各项内容、服务及应用的快速下载，满足终端用户的极致体验，满足垂直行业网络低时延、大流量、安全等诉求。

边缘计算可以按照不同业务场景以及时延的需求灵活部署，通常可部署在接入机房、汇聚机房、地市核心机房等位置。由于受限于边缘站点机房的环境（空间、散热、承重等）以及部署成本等因素，需要为边缘计算进行“瘦身”，减少平台和管理部分占用的资源，实现轻量化部署，提高



资源利用率。“瘦身”主要包括以下几个关键技术,如图3所示。

1) 集中管理。边缘计算的规模较小,数量较多且位置分散,这给其规划、部署、运维、运营带来了极大的复杂性;因此,需要在上级汇聚站点部署统一的边缘计算管理平台,对下级边缘站点进行统一管理。各边缘计算上只部署计算节点和存储节点,减少管理模块的资源占用。集中管理方案包括以下几种:

(1) 可用域(AZ)拉远模式,本地无虚拟基础设施管理(VIM):采用AZ拉远模式进行部署和管理,地市/区县级边缘数据中心(DC)部署完整的VIM,区县/接入级边缘DC不部署VIM,资源作为AZ接入远端VIM集中管理,本地无管理开销。这对网络要求高,AZ模式管理计算节点数量有限。

(2) Cell拉远模式,本地无VIM:采用Cell拉远模式进行部署和管理,地市/区县级边缘DC部署完整的VIM,区县/接入级边缘DC不部署VIM,本地只部署消息队列和数据库,资源作为Cell接入远端VIM集中管理。

这对网络要求高,Cell模式管理计算节点数量多。

(3) VIM本地轻量化,多VIM集中远程运维:采用本地轻量化VIM模式进行部署和管理,地市/区县级边缘DC部署完整的VIM和多VIM管理模块,区县/接入级边缘DC部署轻量化VIM,轻量化VIM接入远端多VIM管理模块集中管理,对网络要求低<sup>[5-6]</sup>。

2) 融合部署。为实现轻量化部署,可以考虑3个层面的融合:

(1) 硬件层面的融合,即将分布式存储节点部署在计算节点上;

(2) 运维的融合,即分布式存储运维节点部署于控制节点计算;

(3) 虚层的融合,即云平台同时支持虚机和容器双核技术,实现上层应用的按需部署,便于快速部署和升级。

### 2.1.5 自动化运维

面对5G基站数量大量增加、控制面云化部署、用户面下沉到边缘实现分布式部署等因素的影响,运营商网络变得越来越复杂,用户网络行为和性能也变得比以往更加动态化

并难以预测;因此,5G核心网需要充分利用人工智能(AI)、大数据等新技术,实现网络自动化,以降低网络运维复杂度和提升效率。

1) 自动化设计。通过设计工具自动生成开局脚本,包括DC资源、网络、虚拟网络功能(VNF)、切片的高级设计文档(HLD)和低级设计文档(LLD)的生成;提供硬件、云平台、MANO、VNF、切片的端到端自动化部署;自动化完成业务配置和测试,加速业务上线时间。

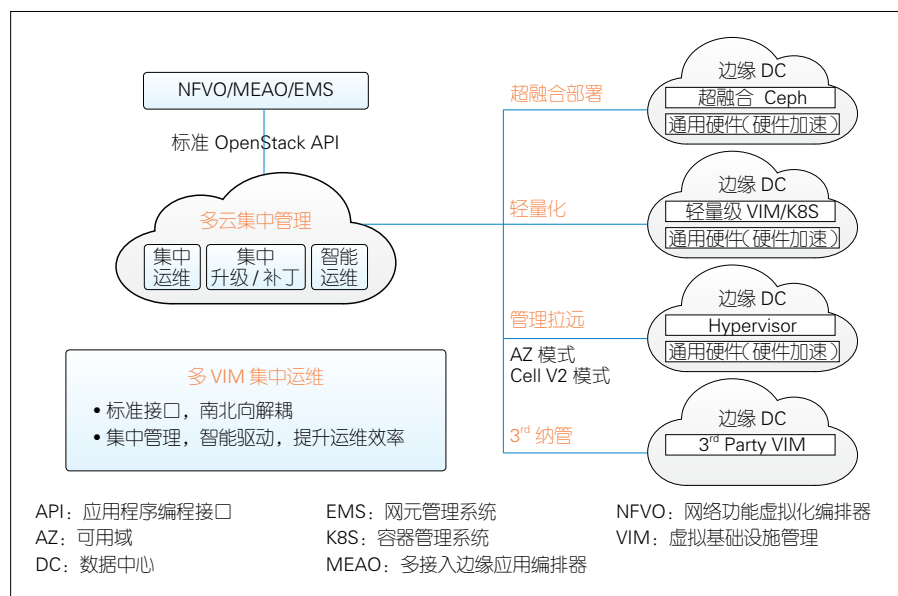
2) 自动化排障。面对5G网络每时每刻产生的大量告警,需要充分利用机器学习实现告警关联、根因定位,并结合故障自动诊断和恢复程序,将潜在的故障形成自动闭环,减少派往一线的工单数量,提升运维效率。基于AI和专家经验铸就的智能根因分析(RCA)系统,内置人工智能引擎,同时支持模糊匹配和精确匹配,将资源层告警进行模型抽象。VNF只需关心引发告警的资源属性原因,如网络、内存、CPU、主机、云盘等;VNF与资源层的关联规则通过抽象的资源属性打通,方便VNF与网络功能虚拟化基础设施解决方案(NFVI)解耦。

3) 灰度升级。为了实现产品快速迭代,满足行业的差异化需求,可以通过灰度升级实现新老版本快速平滑升级和回退,保证业务的连续性。灰度升级可以通过灵活的灰度策略,按用户群、APN、链路等逐步割接用户和业务;通过A/B测试提前发现或降低故障对商用环境的影响,从而最大程度减少升级后程序bug引起的灾难性后果。

## 3 5G 核心网长期演进技术研究

### 3.1 演进挑战

5G 定义万物互联时代,赋能于各



▲图3 端到端网络切片架构

行各业，推动全社会数字化转型，并向海量连接、大带宽、低时延的大连接时代迈进。全球各大运营商及组织积极探索 5G 与行业结合的应用，研究 5G 与垂直行业融合的需求和解决方案，开展试验与应用示范，进行产业应用与推广。面对全行业数字化转型对网络架构、产品功能、服务质量和运维运营不断提出的更高要求，5G 核心网将面临着如下的长期演进挑战：

1) 差异化需求的挑战。5G 网络不仅满足个人需求，更是满足各个行业的产业需求。与个人需求不同的是，行业需求差异性非常大，即使是同一行业，其应用场景的不同需求差异性也比较大。例如，在电力行业中，差动保护对时延和可靠性要求非常高，时延要在 10 ms 以内，而可靠性则要达到“6 个 9”，但对带宽要求并不高；电力抄表则是需要更多的网络连接数量，但对时延和带宽不敏感。5G 核心网需要继续按需提供差异化、可保障的网络能力。

2) 安全可靠性的挑战。5G 网络将连接 70 亿人、万亿级设备，服务各行各业，直接关系工业生产。这也同时意味着任何故障可能造成严重的破坏性事件，安全服务必须放在首位。近年来，电信网络“黑天鹅”事件频发，安全可靠网络对 5G 网络商用非常重要，5G 核心网安全可靠持续增强不可或缺。

3) 网络分建的挑战。在 5G 初期，个人需求和行业需求差异性比较大，为了保障个人网络稳定可靠，可以将个人网络和行业网络分开建设。随着行业不确定需求的逐步确定、个人用户和行业用户的深度融合以及新兴技术的日益成熟，个人网络、行业网络分开建设将带来网络运维成本的增加、深度融合的个人和行业用户体验下降等方面的问题。

## 3.2 关键技术

### 3.2.1 行业专网使能技术

垂直行业对网络的要求差异化比较大，有些行业对时延比较敏感，希望构造时间敏感网络；有些行业对接入要求随时随地，希望定制化专属广域“局域网”；有些行业对安全可靠要求比较高，希望拥有一张 5G 专网。根据行业的需求，目前如下几个关键技术可供灵活选择或组合，从而提高 5G 网络的敏捷性，满足万物互联的差异化需求。

1) 5G 时间敏感型网络 (TSN) 技术<sup>[7]</sup>是新一代以太网技术，具备精准的流量调度能力，可以保障多种业务高质量的共网传输，并将 TSN 网络无线化，可以更好地支持工业控制领域应用。5G TSN 将 5G 网络充当 TSN 桥，确保用户面功能 (UPF) 和用户设备 (UE) 之间的确定性时延，主要技术包括：与 TSN 系统互通架构、5G 高精度时钟同步技术、Bridge 端口和协议数据单元 (PDU) 会话的映射、QoS 映射、针对确定周期性传输的 QoS 控制、针对 TSN 数据流的缓存技术、同一 UPF 下的 UE-UE 直接通信以及确定性通信的能力开放等。

2) 5G 局域网 (LAN) 技术是为垂直行业客户提供定制化的广域网——“局域网”，使得企业终端与企业云随时随地处于一个虚拟化局域网 (或虚拟组) 中，无缝接入企业专网和企业私有云。5G LAN 主要技术包括：5G 用户虚拟组管理技术，以支持对虚拟组成员的动态加入、删除和修改，实现对虚拟组内终端通信的会话控制；增强策略控制技术，以控制 UPF 内和 UPF 间直接包交换，实现虚拟组内终点对点、点对多点的直接通信；虚拟组内路由快速收敛和隧道调度控制优化技术，自适应感知网络

拓扑结构变化，实现路由快速收敛，避免路由震荡，提升传输效率。

3) 5G 专网 (NPN) 技术是基于闭合接入组 (CAG) 和网络切片的结合，实现端到端资源隔离，限制非垂直行业终端接入专属基站和频段，保障行业客户网络安全和资源独享，提供为工业领域特定用户组服务的专有网络，例如在工厂内专门为机器人控制服务的网络。为了和公网进行区分，NPN 网络具有独立的网络标识 (NID)，可以实现终端接入公网或私网的网络选择，以及公有网络和专属网络的互访控制。

4) 增强型车用无线通信 (eV2X) 是一种全新 V2X 技术，通过 Uu 接口或直连接口 (PC5) 实现。PC5 接口支持单播、广播和组播 3 种方式，PC5 QoS 支持基于 QoS 流的 QoS 控制；而在 Uu 接口方式下，可以通过 QoS Profile 机制进行 QoS 控制，即网络下发多个 QoS profile 给基站，基站再根据实际情况选择合适的 QoS profile 实行 QoS 控制。

### 3.2.2 安全可靠技术

#### 3.2.2.1 端到端控制面可靠性增强

控制面池化技术是多个核心网节点组成一个资源池，无线接入网络 (RAN) 节点连接到这个资源池中的所有核心网节点，并根据核心网节点工作状态选择某个核心网节点来为用户提供移动服务。该技术存在的问题是在资源池内如果任何一个核心网节点发生故障，RAN 节点都可以选择另外一个可用核心网节点来提供服务。此时，用户业务可以继续使用，但不能提供业务无缝连续性，无法满足高可靠的行业业务要求如远程医疗、自动驾驶等。因此，需要针对现有资源池机制进行增强，网络功能 (NF) / 网

络功能服务 (NFS) 集群概念就被提出来了, 如图 4 所示。

网络功能集群在资源池技术上做了如下几点增强, 从而保障任何一个网元故障时用户业务仍能实现无缝连续, 满足了垂直行业的高可靠要求。

1) 数据存储的高可靠增强: 采用统一存储和管理, 实现在线数据共享; 灵活的同步机制保证数据一致性 (网络 QoS 良好时, 采用同步复制; 网络 QoS 差时, 采用异步复制); 四级备份和恢复保障数据安全可靠, 内存 / 磁阵 / 本地硬盘 / 外部存储设备组成四保险; 用户的动态数据和静态数据实时保存。

2) 业务处理的高可靠增强: 无状态云化架构采用统一数据存储, 实现业务处理与数据分离; 业务处理由 N+M 负荷分担替代原 1+1 主备, 降低成本提升资源利用率; 实现秒级弹缩, 提升用户业务体验及网络运维可靠性。

3) 丰富容灾组网的高可靠增强: 数据存储支持 N+K 地理容灾, 满足不同应用场景; 接入网元根据权重, 在集群内灵活接管业务; 多用户面和多控制面混合组网, 可保障任何一个网元故障, 用户仍能正常无缝连续接入。

### 3.2.2.2 端到端用户面可靠性增强

在 3GPP R15 及之前的电信网络中, 终端和网络、无线和核心网的用户面数据传输都是单连接的, 任何一个节点发生故障, 都会导致业务短时间中断。为了满足垂直行业可靠性要求, 需要对端到端用户面进行可靠性增强, 增强方案如图 5 所示。

其中, 主要的增强点为:

1) 终端通过双连接技术和核心网建立两个独立的 PDU 会话, 利用两个 PDU 会话传输数据;

2) 每个 PDU 会话分别承载在独立的无线 5G 基站 (gNB) 和核心网

UPF 上, 任何一个网元节点故障都不会影响其他 PDU 会话业务连续性;

3) 应用层进行包复制和重复包检测, 任何一个节点发生故障, 通过端到端双链路机制都能收到完整的业务报文, 确保业务连续性。

### 3.2.3 ToB/ToC 融合建网

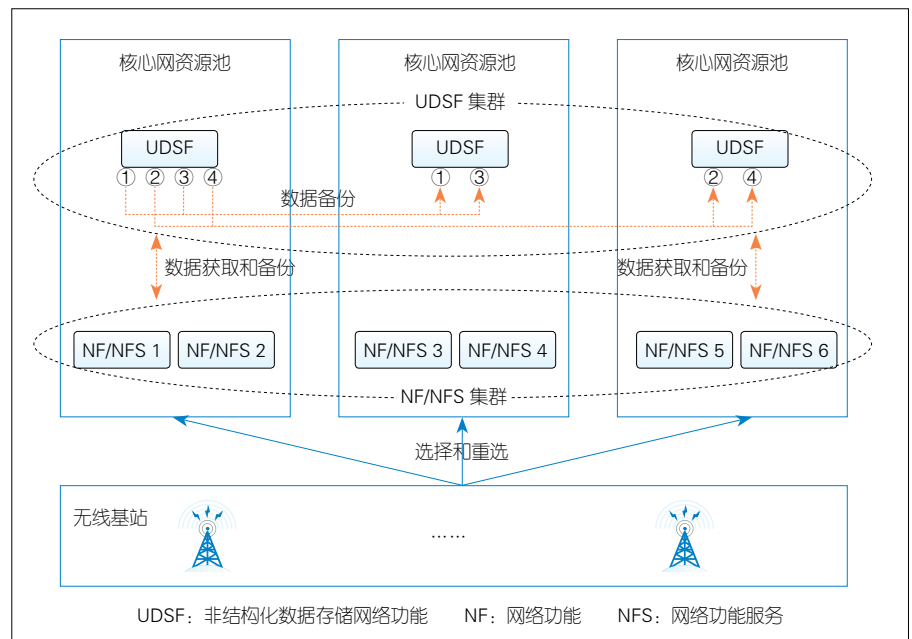
在 5G 建设初期, 有个人用户 (ToC) 和垂直行业用户 (ToB) 之分, 差异显著, 主要体现在: 个人用户业务类型单一, 主要以 eMBB 为主, 市场成熟, 需求稳定, 和现网联系紧密; 而行业用户业务类型多样, 包括 eMBB/URLLC/mMTC 等多种场景, 市场处于培育期, 需求多变, 可不依

赖现网单独发展。因此, 针对 ToC 和 ToB 的情况, 可采取分开建网的策略, 这有利于 5G 快速建网和创新、简化规划和运维。

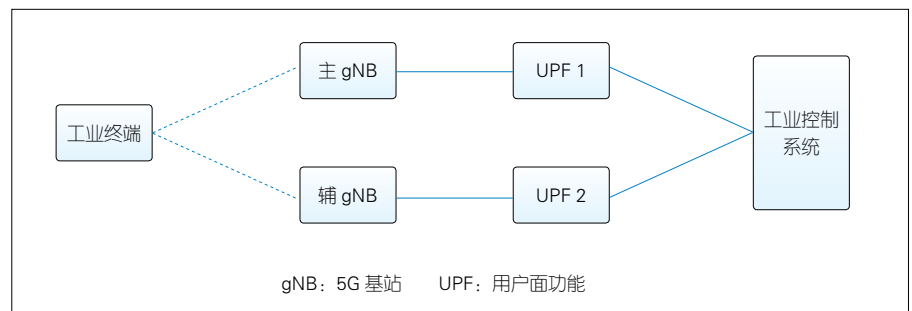
在 5G 建设中后期, 考虑到运营商 ToB/ToC 网络都已经成熟, 降低成本和持续演进则成为关键需求。这就急需一个 ToB/ToC 融合核心网, 面向 5G ToB/ToC 用户的融合, 并同时满足 2G /3G /4G /5G/Fixed 的全接入, 如图 6 所示。

在 ToB/ToC 网络融合阶段, 需实现以下几个方面的融合。

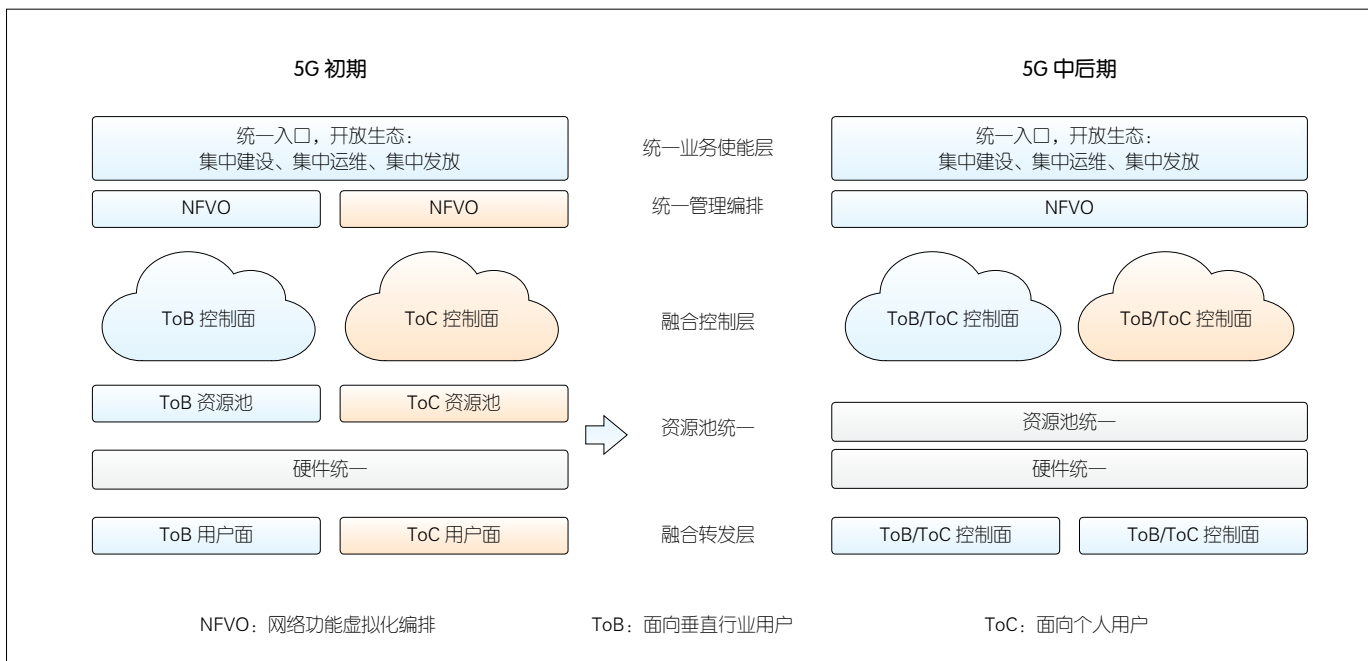
1) 统一业务使能层: 统一入口, 业务集中建设、集中运维、集中发放, 满足个人和行业用户深度融合需求,



▲ 图 4 网络功能集群架构图



▲ 图 5 用户面可靠性增强架构图



▲图 6 ToB/ToC 融合演进图

提升用户体验;

2) 统一管理编排: 采用统一的资源管理系统和切片编排系统, 实现 ToB 和 ToC 网络的资源统一调度, 统一编排, 按需分配, 提升资源利用率, 降低设备成本;

3) 统一资源池: 采用统一的虚拟层软件, 减少运维工作量, 降低管理成本;

4) 融合控制面和转发面: 个人和行业用户共享融合控制和用户面, 确保个人和行业用户深度融合用户能按需访问业务, 同时提升资源利用率, 降低网络整体成本。

#### 4 结束语

5G 核心网在支撑 5G 网络建设和承载 5G 业务方面起到非常重要的作用。面对第 1 波 eMBB 快速商用需求, 第 2 波乃至更多波次的垂直行业应用差异化需求和演进挑战, 以及网络切片、人工智能、边缘计算、垂直行业使能技术等引入, 中兴通讯提出了基于意图的精准核心网产品, 围绕自

动化、智能化、全融合、全业务的理念实现核心网的能力构建和持续演进, 为运营商快速部署 5G, 为垂直行业的长期发展做好充分准备, 在 5G 万物互联时代助力运营商实现竞争超越。

#### 参考文献

- [1] 3GPP. Adjustments to Rel-16 & Rel-17 time-lines. 2020[R/OL]. <https://www.3gpp.org/specifications/releases>
- [2] 3GPP. Study on architecture for next generation system: 3GPP TR 23.799[S]. 2016
- [3] GSMA Intelligence. Global 5G landscape Q4 [R]. 2019
- [4] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501[S]. 2019
- [5] 中兴通讯. 5G core network 技术白皮书 [R]. 2019
- [6] 中兴通讯. Common Edge 边缘计算白皮书 [EB/OL]. (2019-10-31) [2020-01-03]. <https://www.useit.com.cn/thread-25213-1-1.html>
- [7] 工业互联网产业联盟. 时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书 (征求意见稿) [EB/OL]. (2019-10-31) [2020-01-03]. <http://www.aii-alliance.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=23&id=800>

#### 作者简介



王卫斌, 中兴通讯股份有限公司网络首席科学家; 从事 SDN/NFV、电信云研究, 以及核心网产品规划; 相关产品解决方案荣获 5G 论坛、SDN/NFV 全球大会、世界边缘计算论坛、中国通信学会等多项大奖; 发表核心期刊论文 10 余篇, 获国家发明和实用新型专利 20 余项。



陆光辉, 中兴通讯股份有限公司网络首席架构师; 从事 5G、SDN/NFV、电信云研究, 以及核心网产品规划。



陈新宇, 中兴通讯股份有限公司电信云及核心网产品总经理; 负责核心网整体经营, 从事 5G 核心网、电信云等关键技术研究。

# 5G 核心网规划建设 的挑战及策略

## Challenges and Strategies of 5G Core Network Planning and Construction

肖子玉 /XIAO Ziyu

(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)  
(China Mobile Group Design Institute Co., Ltd, Beijing 100080, China)



**摘要:** 结合 5G 标准产业的进展, 提出 5G 核心网规划建设所面临的挑战, 并对其中非独立组网 (NSA) / 独立组网 (SA) 架构的选择、用户业务的继承性、面向未来发展策略等关键问题进行深入分析和探讨。提出了面向个人用户和垂直行业用户进行融合数据面、控制面、用户面的网络规划策略, 以及实现面向 5G 网络基础设施的云化转型、2G/4G/5G 协同发展和 5G 用户国际漫游的规划建设策略。

**关键词:** 5G 核心网; 规划; 策略

**Abstract:** Based on the progress of 5G standard industries, the challenges of 5G core network planning and construction are put forward. The non-standalone (NSA)/ standalone (SA) architecture selection, user business inheritance, future-oriented development strategy and other key issues for 5G core network are analyzed and discussed in depth. Then the network planning strategy to integrate data surface, control surface and user surface for individual users and vertical industry users, as well as the planning and construction strategy which achieve cloud transformation for 5G network infrastructure, 2G/4G/5G collaborative development and 5G users international roaming is proposed.

**Keywords:** 5G core network; planning; strategy

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.1239.006.html>

网络出版日期: 2020-06-22

收稿日期: 2020-04-12

## 1 5G 标准和产业进展

3GPP 5G 标准 R15 版本聚焦增强移动宽带 (eMBB) 业务, 主要定义了 5G 全新网络架构, 包括网络切片、服务化架构、边缘计算架构、移动性管理、会话管理分离和基于流粒度的服务质量 (QoS) 设计等。R15 定义了与网络部署相关的 3 大网络架构: 基于 4G 核心网 (EPC) 的新空口 (NR)

双连接架构——R15 NR 非独立组网 (NSA)、基于 5G 核心网的独立组网架构——R15 NR 独立组网 (SA) 以及基于 5G 核心网的 NR-LTE/LTE-NR 双连接架构 (R15 Late Drop)。R15 NR NSA 和 R15 NR SA 的标准均已于 2017 年 12 月和 2018 年 6 月冻结; R15 Late Drop 版本也已于 2019 年 3 月冻结。

3GPP 5G 标准 R16 和 R17 版本聚

焦垂直行业应用。R16 版本标准主要包括增强超可靠低时延通信 (URLLC)、增强车用无线通信技术 (eV2X)、物联网 (IoT) 支持和演进、5G 局域网、5G 定位和位置服务、网络自动化等。R16 标准预计于 2020 年 6 月冻结。5G R16 标准完成后, 基于 R16 及后续 R17 的 5G 核心网才真正能够实现 eMBB、URLLC、海量大连接 (mIoT) 3 大场景网络能力, 全面支撑 5G 面向

垂直行业的发展。

## 2 5G 核心网规划建设面临的挑战

### 2.1 5G NSA 和 SA 的选择

目前 R15 NSA 和 SA 架构是标准及产业成熟度较高的两种架构，如图 1 所示。其中，NSA 架构采用 4G EPC 增强控制 5G NR，以支持终端双连接；SA 架构采用全新 5G 服务化核心网架构。2019 年已商用的 5G 网络主要采用 NSA 技术架构，该方案的优势是 5G 先发部署。建网初期，在 5G 覆盖不足的情况下，采用 NSA 架构可充分发挥 4G/5G 协同优势，由 LTE 基站保证用户流量的承载。由于采用和 4G 共用 EPC 核心网，对于没有签约的 5G NSA 终端，只要网络归属签约用户服务器（HSS）/增强移动性管理实体（MME+）默认允许 NSA 接入，在 5G NR 覆盖区的用户可以建立至 NR 的 5G 承载，接入 5G 网络体验 5G 业务。

5G SA 定义了 5G 全新网络架构，包括网络切片、服务化架构、边缘计算架构、移动性管理、会话管理分离和基于流粒度的 QoS 设计。这些架构功能在 R16 标准中被进一步增强，满足了 URLLC 和 V2X 等需求。5G SA 架构的核心网是革命性的变革，产业成熟度低；因此，大多数运营商将 5G SA 架构作为 5G 网络的目标架构。以中国移动为例，2019 年 5G 开始商用，主要采用 NSA 架构，并基于 4G EPC 来部署 5G NSA 网络；同时，面向垂直行业进行 5G SA 预商用，推进 SA 架构 5G 核心网的成熟。

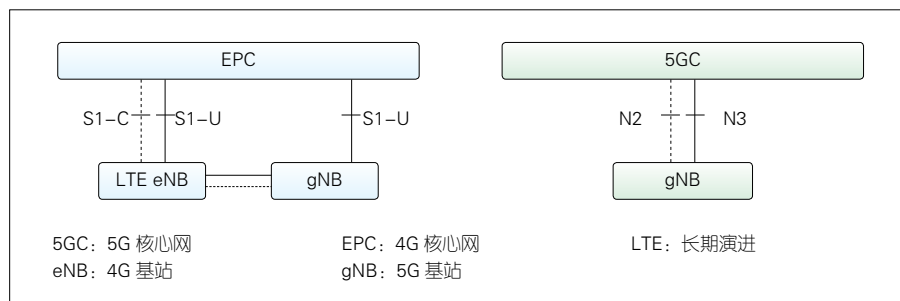
### 2.2 5G 与 4G 的互操作

移动通信换代时都需要满足一个基本要求，即用户不换号。从 4G 到 5G 的网络演进也不例外。移动通信的用户数据存储存储在 4G HSS 中，如果

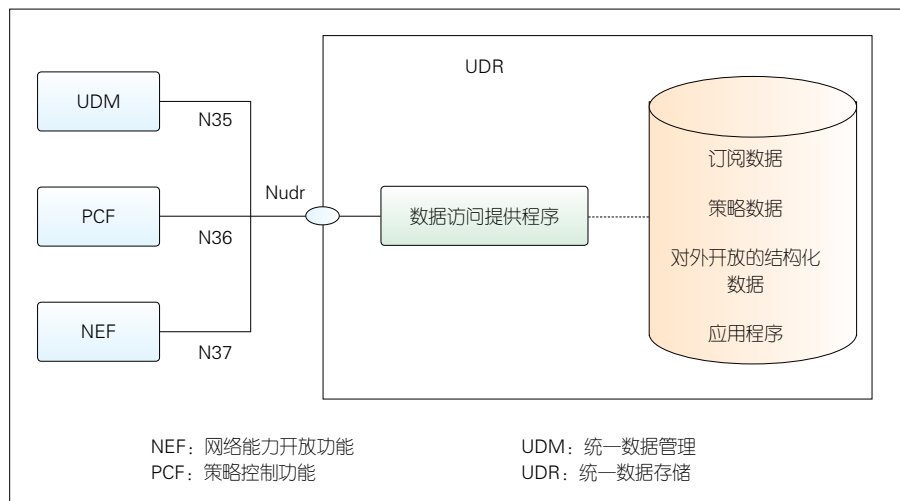
4G 用户开通 4G 语音承载（VoLTE）业务，那么还会涉及到 IP 多媒体子系统（IMS）HSS 设备。现网中为实现用户业务的继承和兼容性，这些用户数据设备以不同方式形成融合网元，即 2G/3G/4G/VoLTE HSS/ 归属位置寄存器（HLR）。当 5G 采用 SA 架构建网时，5G 核心网是一个服务化架构、全云化的网络。其中，用户数据功能统一数据存储（UDR）/统一数据管理（UDM）也是云化网元，要实现 4G 用户不换号也能使用 5G 业务的目标，同样需要融合的用户数据网元。图 2 给出了 3GPP 定义的 5G 用户数据存储架构。

3GPP R15 5G SA 标准定义了 4G/5G 的互操作架构（如图 3 所示），即 4G/5G 融合的 UDM+HSS，以便实现用户的统一签约和统一鉴权管理：

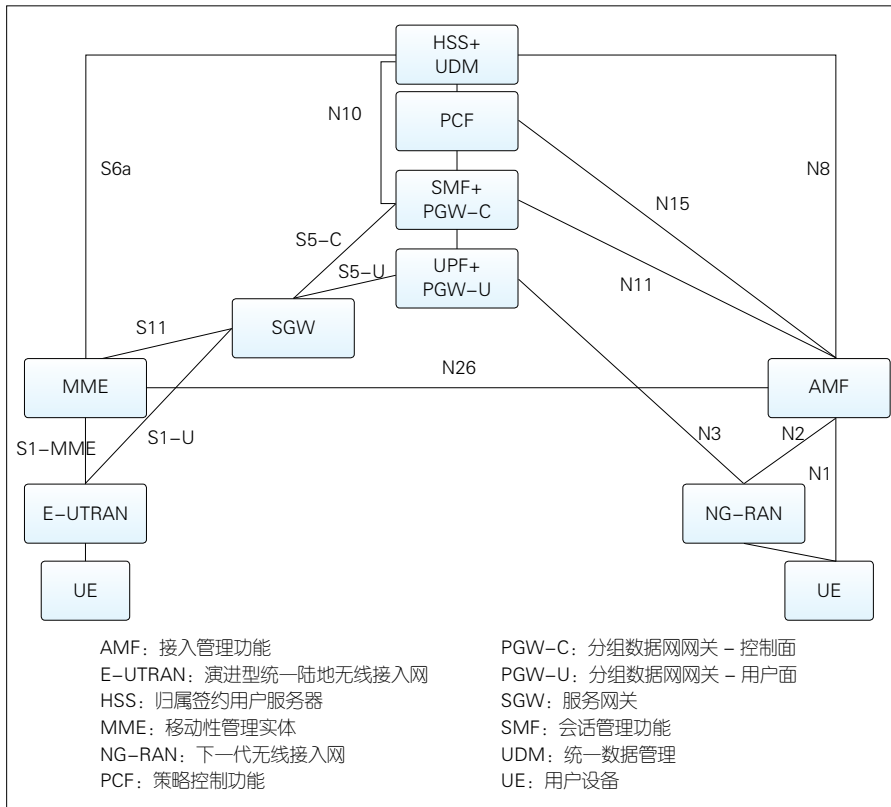
融合的策略控制功能（PCF）+ 策略与计费规则功能单元（PCRF），可以实现用户的统一策略管理；融合的会话管理功能（SMF）+ 分组数据网网关-控制面（PGW-C），可以实现用户的统一会话管理和统一锚点选择，从而实现 4G/5G 切换的业务连续性；融合的用户面功能（UPF）+ 分组数据网网关-用户面（PGW-U），实现统一的用户面隧道锚点功能，保证 4G/5G 切换的业务连续性。因此，在 5G 网络建设中不仅用户数据网元 UDM/UDR 需要与 2G/3G/4G/VoLTE 融合，以上策略管理网元 PCF/UDR、会话管理网元 SMF、用户面网关 UPF 均需与 4G 形成融合网元；而 5G 核心网的服务化和云化新架构与 2G/3G/4G 核心网的融合也将会为 5G 网络的建设带来一些重大挑战。



▲ 图 1 R15 新空口非独立组网和独立组网技术架构示意图



▲ 图 2 3GPP 定义的 5G 数据存储架构图<sup>[1]</sup>



▲图 3 3GPP 定义的 4G/5G 互操作架构（无漫游）图<sup>11</sup>

### 2.3 5G 面向个人用户和垂直行业用户

经济社会发展对信息通信技术的需求越来越迫切。5G 等信息技术与实体经济深度融合，将促进智能连接、云网融合等贯穿到各行各业生产经营各环节，充分发挥对经济发展的放大、叠加、倍增作用，激发经济增长新动能。因此，5G 的使命不仅是满足个人用户（ToC）的需求，改变生活，更重要的是满足垂直行业（ToB）信息化和智能化需求，改变社会。

3GPP 面向垂直行业应用的两大场景（URLLC 和 mMTC）均未在 3GPP R15 版本中完成标准化。在现阶段基于 R15 版本的 5G 网络建设中，5G 能够满足 mMTC 场景的需求；URLLC 的场景将在 R16 版本的 5G 标准中完成，低功耗 mMTC 场景的优化和演进，将在 R17 版本完成。因此，面向 ToB 市场的需求，运营商近期将继续依靠现有

窄带 - 物联网（NB-IoT）和增强机器类通信（eMTC）技术演进。同时，5G 网络建设还要协同 2G/4G 物联网的建设和演进，通过 5G 网络切片能力，满足部分场景 ToB 用户的需求，实现未来 2G/4G/5G 物联网的逐步融合发展。

### 2.4 5G 用户需要实现国际漫游

2019 年，已有韩国、英国、欧洲等多个国家或地区实现了 5G NSA 架构的商用网络服务。根据韩国科学技术信息通信部发布的信息，截至 2020 年 2 月 28 日，韩国 5G NSA 用户数已达 536 万。目前国际上商用 5G 网络已发展了大量的 5G NSA 用户。要实现国际用户能够漫游在中国的 5G 网络中，那么中国也需为 5G NSA 用户保留 NSA 网络。即使中国在 2020 年抢先实现 SA 架构的 5G 网络规模商用，为了保证国际用户能够在中国 5G 网络漫游，依然

需要保留 NSA 架构网络和足够的覆盖能力。这也将是 5G 核心网建设的另一个挑战。

## 3 5G 核心网规划建设策略和关键问题

### 3.1 2G/3G/4G/5G 融合数据面的建设策略

要实现在用户不换号的条件下，网络从 4G 升级到 5G，则需要实现用户数据的融合。现网是 2G/3G/4G 的融合网络，所以融合用户数据和融合策略数据的建设策略需要涵盖现网 2G/3G/4G/VoLTE 的用户数据和现网 4G 的策略数据。数据融合的建设目标和建设策略应以终为始，实现云化用户数据、策略数据的融合和现网数据的迁移。

对于 ToC 用户，主要用户来源为 4G 换机用户和已成为 5G NSA 的用户，对于此类用户需实现 2G/3G/4G/5G/VoLTE 的融合数据层建设和用户数据的迁移。根据工业和信息化部公布的 2020 年 1—2 月通信业经济运行情况数据看，截至 2 月底，3 家基础电信企业的 4G 用户规模为 12.62 亿户。从 3G 到 4G 的网络升级中，4G 用户数据的迁移持续 1~2 年的时间；而面向 5G 用户数据迁移难度更大，从设备形态到网络架构都在云化转型，使得现网网元升级不可行。建设策略<sup>[2]</sup>有以下几种：策略 1，以大区或省为单位新建云化融合用户数据网元 HLR/HSS/UDM/UDR 来替换现网融合 HSS/HLR。云化融合用户数据网元的建设规模需要满足所替换设备的全部容量。对于后端设备（BE）存储数据库，采用云化融合 HSS/HLR/UDR 替换传统 HSS/HLR 后端数据库；对于前端设备（FE）信令处理模块，采用云化 UDM/HSS/HLR FE 设备一次性替换现网 HLR-FE 和

HSS-FE，分别处理不同用户的用户数据接入信令。该策略较适用于现网设备运行年限较长、临近退网或满足折旧期限要求的情况。由于策略1采用替换方案，导致初期建设规模增大，先期的建设成本较高；但优势是可以一步到位达到目标架构，网络架构清晰简洁。

策略2，以大区或省为单位新建云化融合 HLR/HSS/UDM/UDR 设备，容量满足本期工程预测的 5G 用户规模需求，并与现网 HSS/HLR 混合组网，实现 2G/3G/4G 用户开通 5G 后的逐步数据迁移。在该策略下，与新建设备配对迁移的现网 HSS/HLR，需要改造支持与新建设备融合 UDM/UDR 间的接口。当 4G 用户开通 5G 时，该用户的签约数据写入新建融合 HLR/HSS-BE/UDR 数据库中。当用户漫游在 4G 网络使用业务时，服务于该用户的 4G 移动性管理实体 (MME) 设备向现网 HLR/HSS 请求鉴权和签约数据，现网 HLR/HSS 通过新建融合 UDM/UDR 设备间接口获取用户数据。该策略较适用于现网设备版本较新、在网运行时间不长的场景。该策略无须提前进行用户数据迁移，而是当用户更换 5G 手机后，逐步将用户数据迁移至新建融合 UDM/UDR 数据库中。该策略可随用户换机规模逐步建设，先期建设成本与 5G 用户发展规模相关，可以有效利用旧现网设备资源，减少先期投入；但该策略由于需要新旧用户数据设备间开放接口，接口需要进一步规范，实施上存在一定风险。

还有一些其他的非标私有定制化方案，在此不一一赘述。综上所述，5G 核心网 ToC 用户数据层的建设应根据 5G SA 业务需求，统筹考虑数据迁移场景、投资效益等因素后再进行选择，且针对不同区域可以选择不同方案。对于 5G 面向 ToB 用户，采用物联

网号段且均为新用户，不涉及现有用户数据迁移问题。

### 3.2 5G 策略数据融合建设策略

在 3GPP 定义的数据存储架构中，5G 用户数据、策略控制数据、能力开放数据等均存储在统一的后端数据库 UDR 中，如图 1 所示。因此，在建设策略中不仅要考虑策略控制数据 4G/5G 的融合建设，还要考虑用户数据和策略数据是否融合建设。考虑到用户数据和策略数据现网网元厂家分布不同，跨厂家数据迁移难度大；因此，5G SA 网络建设初期可以暂不考虑用户数据和策略控制数据后端数据库网元的融合设置。为实现 4G/5G 网络互操作，5G 策略数据网元 PCF/UDR 需实现与 4G 策略数据网元 PCRF/ 签约数据仓库 (SPR) 的融合。4G 的用户策略需迁移到 4G/5G 融合的云化策略控制网元中，建设策略与 3.1 节用户数据融合相似，主要有以下几种：

策略 1，以大区或省为单位，新建与 4G 融合的 PCF/UDR，以替换现网 PCRF/SPR 设备。

策略 2，以大区或省为单位，新建的 4G/5G 融合 PCF/UDR 与现网 PCRF/SPR 混合组网，同时须升级现网 PCRF/SPR，以支持与新建融合 PCF/UDR 设备的接口。

无论采用以上哪种建设策略，与用户数据融合不同的是：策略控制数据由于控制策略个性化强，现网数据业务控制策略多，异厂家替换工作量大且周期长，风险较大；因此，无论采用策略 1 还是策略 2，均需要考虑实施风险。

### 3.3 5G SA 核心网全云化网络建设策略

5G 移动网络是一个电信级的基础网络，它要求云化网络的云计算基础设施具备电信级高可用性和异地容

灾能力。5G SA 核心网虚拟网络功能 (VNF) 部署在 NFV 云计算资源池中，它面向大众市场和垂直行业提供 5G 服务。5G 网络面向 ToC 和 ToB 用户的多样化需求可通过网络切片技术实现，在 5G 核心网建设中，需要考虑 5G 与现网 2G/3G/4G 融合核心网以及 2G/3G/4G/NB 物联网的协同发展<sup>[3]</sup>。5G SA 核心网控制面网元包括接入管理功能 (AMF)、SMF、网络切片选择功能 (NSSF)、服务注册管理功能 (NRF)、融合计费功能 (CHF) 等，它们均为服务化网元，对外提供服务化接口，其部署策略如下<sup>[4]</sup>：

1) AMF 和会话管理功能 (SMF/网关-控制面) VNF 分别服务于特定区域的基站，可以省或地市为单位集中部署于省或大区中心资源池。

2) NSSF 用于网络切片选择，可以省或大区设置。

3) NRF 主要完成 VNF 服务注册、管理和发现，可以省或大区设置。当需要跨省或跨大区服务发现时，可采用 NRF 网状联接或分级部署。

4) CHF 与网络侧接口实现在线和离线计费部分功能，可与 SMF 同区域部署。当多个 CHF 需要被选择和路由时，可采用直接配置局数据的方式或采用设置 NRF 提供服务注册和服务发现功能来实现 CHF 的发现和选择。

5G SA 核心网用户面为 4G/5G 融合网元 UPF/网关-用户面 (GW-U)，其部署策略为：用户面网元 UPF/GW-U 通过 N3 接口直接与基站相连，通过 N4 接口与 SMF 通信。UPF/GW-U 可以省、地市为单位部署，当部署在地市不能满足业务时延需求时，可向边缘扩展。由于目前 N4 接口不开放，当 UPF 向边缘扩展时，需与辖区 SMF 同厂家。

5G SA 核心网需要与 4G EPC 核心网进行互操作，因此还需要现网 4G



EPC 进行升级改造。

### 3.4 5G SA 核心网用户面 N4 接口开放策略

为实现 5G 面向垂直行业的发展和支撑，5G 引入了边缘计算能力。边缘计算架构可实现 5G UPF 网关下沉到就近用户位置，实现低时延和数据分流应用<sup>[5]</sup>。5G SA 核心网形成集中化的控制面和分布式的用户面的部署架构。用户面 UPF 需要控制面 SMF 的会话控制，来完成会话建立和策略的执行。它们之间的 N4 接口为厂家内部接口，实现流量的实时统计和上报、会话建立命令的下发和执行等多种功能。N4 接口为非开放接口，因此 5G 集中部署的核心网 SMF 需要与分布式部署的 UPF 同厂家设置，这为未来的网络建设和面向垂直行业的发展带来了挑战和限制。中国移动已牵头成立 OpenUPF- 面向垂直行业的 5G UPF 及 N4 接口开放合作伙伴计划，意在解耦 N4 接口，使得用户面 UPF 面向垂直行

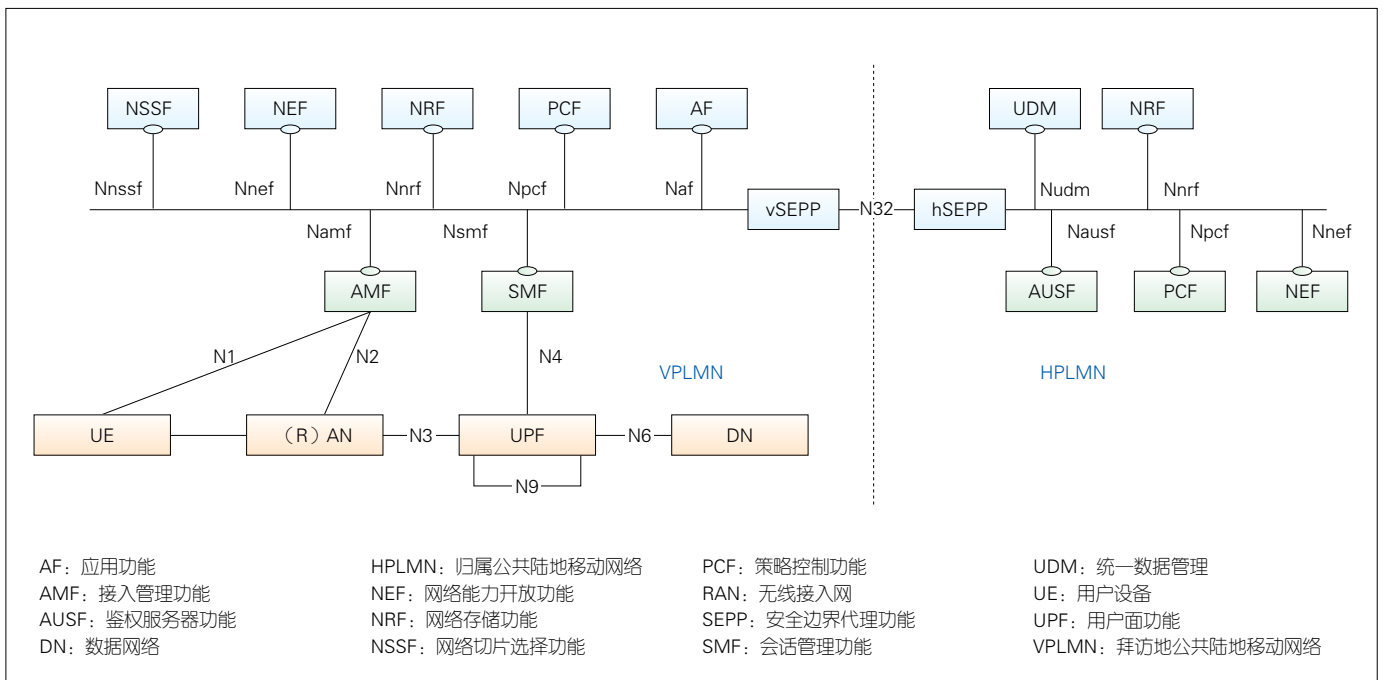
业的边缘节点功能更简单，未来的部署更加灵活。

### 3.5 5G 用户实现国际漫游策略

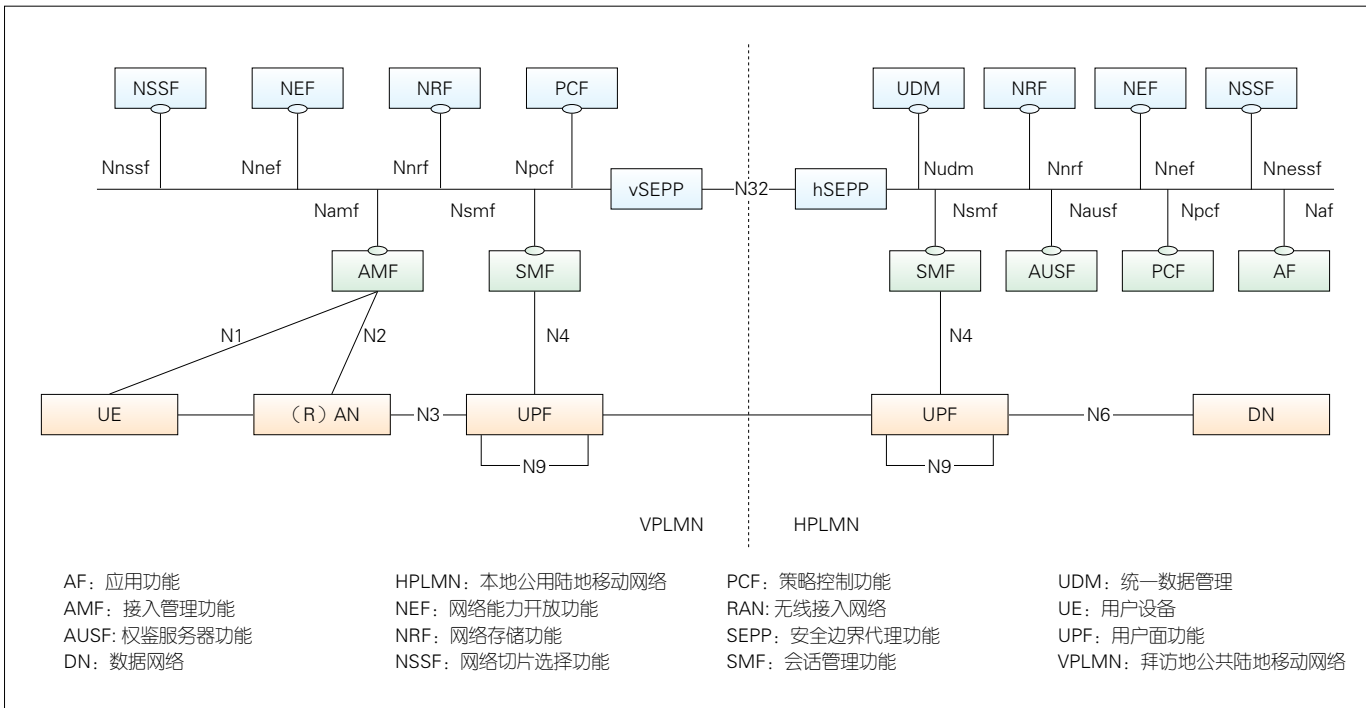
为了保证国际用户能够在中国 5G 网络条件下实现漫游，在 2020 年规模商用 5G SA 的情况下，中国 5G NSA 架构网络和足够的覆盖能力均需要被保留，以满足国际 5G NSA 用户漫入使用 5G 的需求<sup>[6]</sup>。当 5G NSA 来访用户漫游至 5G SA/4G EPC 覆盖的区域时，漫游互通可实现“EPC-EPC”模式，这时用户只能接入 4G EPC 网络漫游，无法使用 5G SA 网络服务；当 5G NSA 来访用户漫游至 5G NSA/4G EPC 覆盖区域时，漫游互通可实现“EPC+-EPC+”模式，此时用户可以接入漫游地 NSA 网络，使用 5G NSA 网络服务；当 5G SA 用户漫游至 5G SA 覆盖区域时，漫游可实现“5GC-5GC”互通模式，用户可以接入漫游地 SA 网络，使用 5G SA 网络服务。为了实现 5G SA 架构核心网国际漫游，3GPP 定义

了本地疏通和归属地疏通两种漫游架构，具体如图 4 和图 5 所示。其中，图 4 描述了 5G 本地疏通漫游架构通过控制面互通的方式，图 5 描述了 5G 归属地疏通漫游架构通过控制面互通的方式。

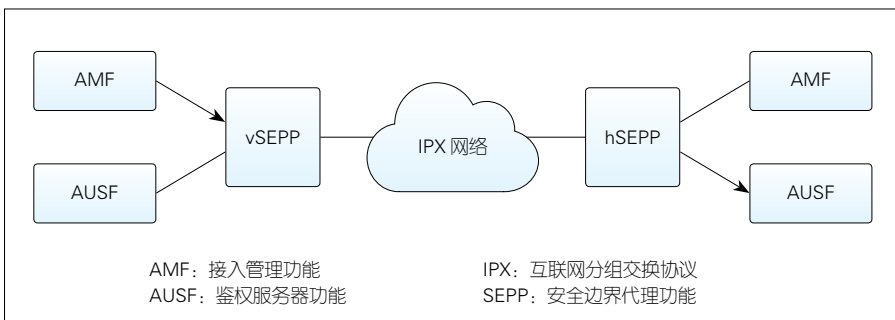
在本地疏通架构中，除归属地用户数据查询和鉴权外，拜访地 PCF 可以根据运营商间漫游协议使用本地配置策略为漫游用户生成业务疏通规则并进行业务的本地疏通，或对归属地 PCF 进行策略查询后生成业务疏通规则并进行业务的本地疏通。在归属地疏通架构中，除归属地用户数据查询、鉴权、策略数据查询和生成外，还涉及跨两地会话连接的建立，以便建立从拜访地到归属地的用户面隧道连接。以上跨运营商核心网的控制面交互均通过 3GPP 定义的安全边界代理功能（SEPP）实现。SEPP 实现消息过滤和拓扑隐藏功能，因此 5G SA 核心网国际漫游互通双方均须部署自己的 SEPP，所有控制面互通的消息均通



▲图 4 5G 本地疏通控制面互通的漫游架构示意图<sup>[6]</sup>



▲图 5 5G 归属地疏通控制面互通的漫游架构示意图<sup>[1]</sup>



▲图 6 跨运营商 5G 独立组网信令互通示意图<sup>[7]</sup>

过 SEPP 进行中继转发。不同运营商间 SEPP 的互通通过 IPX 网络完成互通，如图 6 所示。

#### 4 结束语

2020 年是 5G SA 核心网规模商用的第 1 年，产业界主要负责提供满足 5G R15 阶段的 5G 核心网设备。一方面伴随 5G 核心网的网络云化转型以及 5G 网络切片和边缘计算的引入，移动网络的架构发生了巨大变化；另一方面移动网络需同时服务于 ToC 和 ToB 多样化需求的市场，这使得 5G 核心网的引入和部署策略受到诸多条件的制

约，策略选择也非常多样。文中，我们仅结合移动用户和网络需求进行了 5G SA 核心网初期引入的相关策略分析和探讨。随着 5G R16 标准的进一步完善以及产业的逐步成熟，5G 增强核心网将能满足更多场景，提供更高服务质量要求。未来，5G 核心网网络规划建设策略也将面临更多问题，需要研究者们进一步探讨。

#### 参考文献

- [1] 3GPP. Technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system; stage 2 (Release 15): 3GPP TS

23.501, V15.6.0[S]

- [2] 赵远, 肖子玉, 韩研, 等. 5G 融合用户数据架构演进方案[J]. 电信科学, 2019,(6):124-131
- [3] 马洪源, 肖子玉, 卜忠贵, 等. 面向 5G 的核心网演进[J]. 电信科学, 2019,(9):135-143
- [4] 杨旭, 肖子玉, 邵永平, 等. 面向 5G 的核心网演进规划[J]. 电信科学, 2018,(7):162-170
- [5] 马洪源, 肖子玉, 卜忠贵, 等. 5G 边缘计算技术及应用展望[J]. 电信科学, 2019,(6):114-123
- [6] 肖子玉. 多模共存的 5G 网络部署关键问题探讨[J]. 电信工程技术与标准化, 2019,(11):37-41
- [7] 3GPP. Security architecture and procedures for 5G system: 3GPP TS 33.501, V15.6.0[S]

#### 作者简介



肖子玉, 中国移动通信集团设计院有限公司网络所总工程师, 教授级高级工程师, 中国通信协会信息通信专委会委员, 美国北卡罗来纳州立大学访问学者; 主要从事通信工程咨询、设计和研究工作, 在 5G 核心网、NFV、IMS、RCS 等领域积累了丰富的咨询设计和研究经验; 荣获部级以上科学技术奖、优秀工程咨询和设计奖 8 项; 发表论文 40 余篇, 获授权专利 2 项。

# 5G 核心网技术演进及挑战

## Technologies Evolution and Challenges of 5G Core Network



赫罡 /HE Gang, 苗杰 /MIAO Jie, 童俊杰 /TONG Junjie

(中国联通网络通信有限公司, 北京 100032)  
(China United Network Communications Limited, Beijing 100032, China)

**摘要:** 对移动核心网的技术演进进行了回顾, 并详细分析了 5G 架构和关键技术演进。认为 5G 核心网在功能增强、云原生及软件技术、网络自动化、智能化等方面得到提升, 但在应用和服务创新、网络成本以及自主可控等方面, 仍然面临各种挑战。

**关键词:** 5G; 核心网; 演进; 挑战

**Abstract:** The technology evolution of the mobile core network is reviewed, and 5G architecture and key technologies are analyzed. 5G core network has been improved in the function enhancement, cloud native and software technology, network automation and intelligence and other aspects, while it still faces various challenges in application and service innovation, network cost and self-control.

**Keywords:** 5G; core network; evolution; challenges

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200624.1730.008.html>

网络出版日期: 2020-06-28

收稿日期: 2020-04-08

## 1 核心网技术演进回顾

移动通信大约每 10 年就出现新一代的技术, 通过引入关键技术实现网络容量数倍的增长, 并推动新业务类型不断涌现。自 20 世纪 80 年代以来, 移动通信技术经历了 4 个发展阶段, 均对经济社会的数字化发展产生了广泛而深远的影响。从 2G 到 4G, 移动核心网网元之间基于固定链路完成信令交换, 网络的控制面和用户面不断分离以至解耦。与 4G 相比, 5G 使用全新的网络架构, 能够提供至少 10 倍于 4G 的峰值速率, 以及毫秒级的传输时延和千亿级的连接能力。5G 核心网使能网络全连接、全业务,

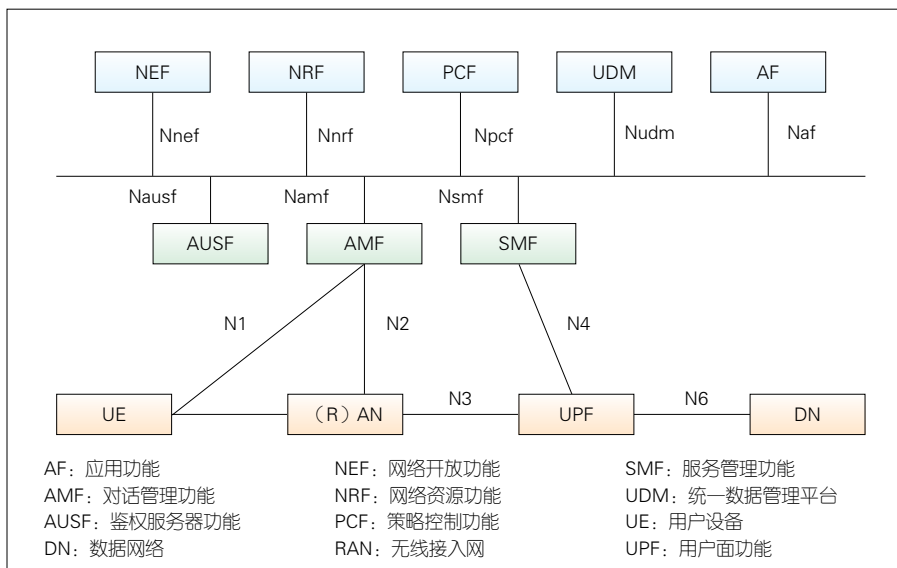
提供“网络即服务”的能力, 将以“网络为中心”的服务模式转为“客户 + 云双中心”新型服务模式, 同时基于云化、虚拟化等关键技术按需提供差异化的能力和服务<sup>[1-2]</sup>。

5G 核心网对传统架构进行了重构, 以网络功能 (NF) 的方式重新定义了网络实体, 同时还引入软件定义网络 (SDN) / 网络功能虚拟化 (NFV) 技术实现网络云化。各 NF 对外按独立的功能 (服务) 提供功能实现并可互相调用, 即将一个 NF 进一步拆分成若干个自包含、自管理、可重用的 NF 服务。NF 相互之间解耦, 具备独立升级、独立弹性的能力, 具备标准接口与其他 NF 服务互通的能力, 并且可通过编

排工具根据不同的需求进行编排和实例化部署。3GPP 定义的服务化网络架构如图 1 所示, 每个 5G NF 定义了一组具备对外互通标准接口的 NF 服务, 从而实现了从传统的刚性网络向基于服务的柔性网络的转变、从固态网络到动态网络的转变, 实现网络资源虚拟化、网络功能的解耦和服务化<sup>[3]</sup>。其次, 控制功能的集中化、数据转发的分布化处理, 使得 NF 可以进一步下沉并靠近用户和应用, 大幅度提高网络数据吞吐量, 降低业务时延<sup>[4]</sup>。

## 2 5G 核心网技术演进

5G 核心网技术演进主要体现在以下几个方面: 随着技术标准演进, 新



▲图1 5G网络服务化架构

功能的引入、原有架构的完善；微服务、容器等云计算技术的广泛采用，使得5G核心网从虚拟化向云化发展；基于人工智能（AI）技术、数据分析技术的网络自动化和智能化。

## 2.1 5G 核心网功能增强与演进

3GPP作为5G标准化工作的引领者，在R15中就对5G核心网技术进行了规范，并完成了5G核心网整体架构及基本功能的定义。R15主要支持增强移动宽带（eMBB）业务场景的基础特性。

R16重点对5G核心网特性进行了增强，具体包括4方面的内容：

1) 服务化架构增强：增强服务化架构（eSBA）对5G核心网服务化架构的代理服务发现及间接通信进行了增强，通过引入新的功能实体——服务通信代理（SCP）实现服务化消息的非直接通信；提出基于NF集群和服务集群的可靠性增强，使得同样类型的NFV实体或NFV服务实体组成一个集群，且服务发现以集群为粒度，提升服务交互可靠性。

2) 超可靠低时延通信（URLLC）特性增强：提出5G-URLLC支持基于

冗余传输方案的高可靠性通信方案和基于冗余用户面路径机制的移动性过程中会话连续性的方案。

3) 网络数据分析功能（NWDAF）功能增强：5G网络自动化关键技术（eNA）项目围绕NWDAF的5G核心网自动化管理架构，完善了数据收集、反馈的网络架构。

4) 会话管理功能（SMF）/用户面功能（UPF）拓扑增强：5G网络中SMF和UPF拓扑增强研究（ETSUN）项目重点面向用户的移动性管理场景，通过由目标对话管理功能（AMF）控制插入一个中间SMF（I-SMF）解决跨SMF管理区域的移动性流程。

R17重点关注场景支撑和能力增强，先后立项5G多播组播架构增强（5MBS）、边缘计算特性增强（enh-EC）、无人机增强（ID\_UAS）、近场通信（5G\_ProSe），并针对用户标识使用增强、UPF服务化和用户设备（UE）Policy增强开展进一步研究。

1) 增强的无人机系统项目EAV：主要完善3GPP网络在应对各种无人机应用场景所要满足的关键性能指标（KPI）。

2) 非公共网络（NPN）服务：重

点针对NPN网络与公众网络的互通、业务连续性及运维问题。

3) 边缘计算增强：主要实现支持增强移动边缘计算（MEC）功能，为典型的MEC应用场景提供部署指南。

4) 5G局域网（LAN）功能增强：5G LAN支持在一组接入终端间构建二层转发网络，并通过5G SMF与UPF的交互实现终端组内数据交换和用户面路径选择。5G LAN组管理的能力可以通过网络开放功能（NEF）供业务平台使用。

## 2.2 云原生及软件技术

3GPP在R15中引入基于服务的体系架构SBA，结合了IT中云原生的概念，通过对5G核心网的虚拟化、云化以及软件架构的微服务化，实现网元的持续交付和快速迭代，支撑业务的快速上线和敏捷部署。云原生技术在5G核心网中主要体现在无状态设计和服务化解耦两个方面。在无状态设计方面，实现了业务处理、数据、转发的完全解耦，保证了当单个业务处理节点发生故障时，业务消息被负载均衡分发到其他正常状态的业务处理节点，新的业务处理节点与后台数据库可及时同步用户状态并正常处理用户的业务消息。在服务化解耦方面，将单体式应用架构拆解为多个独立的服务模块，并基于开放应用程序编程接口（API）以服务化方式通信以及服务治理框架进行管理，实现灵活组合和独立升级，支持新业务快速上线。

在技术实现上，依靠虚拟化和微服务架构，使用Docker+Kubernetes的技术组合，实现对微服务的运行支撑、编排管理和有效治理<sup>[5]</sup>。微服务架构是一个天然分布式的服务框架，可以对服务进行更小粒度的划分，实现系统组件的高内聚和低耦合。每个子系统可以独立运行、升级和测试，具备

较高的可靠性，同时加快了软件的迭代开发和上线。但是微服务之间的数据一致性、安全访问，以及服务数量庞大带来的实施和管理复杂度等问题需要重点关注。5G 核心网网元功能和接口虽然在 3GPP 标准协议中有明确的定义，但是网元功能如何拆分成微服务以及拆分后如何进行高效的迭代管理，则由各个厂商实现；而实现的结果关系到 5G 核心网网元是否可以满足未来 5G 业务快速上线、部署和迭代的需求。

### 2.3 网络自动化、智能化

5G 核心网正在经历向云原生的转变，更多的 5G 核心网 NF 将越来越多地根据云原生原则进行设计。这种深刻的变化对 NFV 管理和编制提出了更高的自动化要求，以满足前所未有的操作灵活性和效率。

针对 5G 网络面临的规建维的挑战和问题，众多标准和开源组织都开展了自动化、智能化的相关研究和应用。TMF 在 2019 年发布的白皮书中

提出了对自治网络进行 L0—L5 的分级，并基于增强业务流程框架 (eTOM) 模型给出了其具体在运维效率、能源效率、资源效率、用户体验提升等方面的分级自治框架和具体目标场景映射<sup>[6]</sup>。此外，3GPP、ITU-T、ETSI、CCSA 等标准组织，在应用场景和架构上开展了相关标准化工作，开源组织和运营商纷纷牵头成立了 Acumos、CubeAI 等开源项目<sup>[7]</sup>，旨在探索人工智能技术在网络领域的应用，带来网络能力和业务感知的全面提升。

当前，自动化和智能化的实际应用探索主要集中在无线领域和网络传输领域<sup>[8-9]</sup>，在 5G 核心网方面尚未形成较为完善的场景和架构体系。针对网络设计和运行维护的一个典型全生命周期流程如图 2 所示。在该流程中，可以利用自动化和智能化技术提升流程效率和效果，降低人力成本支出。例如，在网络规划方面，可以通过对用户行为、终端能力、业务情况等综合分析，通过业务预测来提升网络规

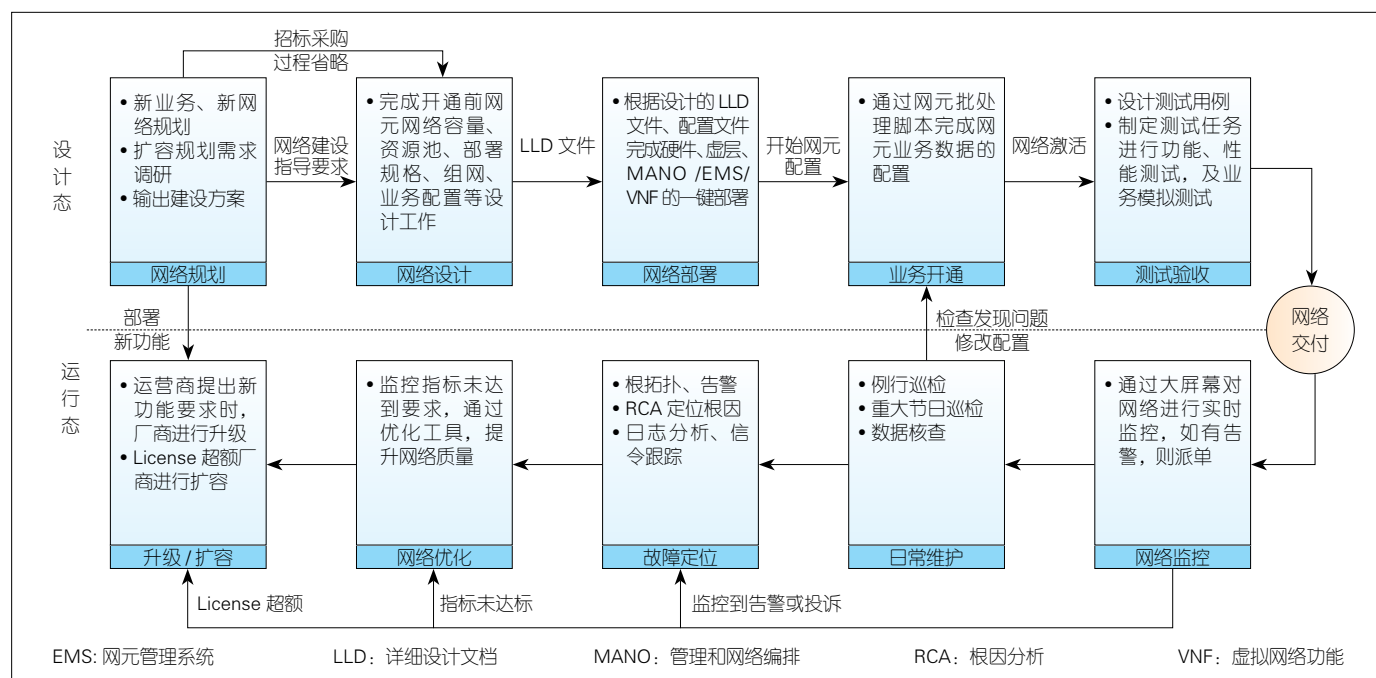
则的准确度，提升规划效率，有效缩短网络建设周期，并使得建设容量也更为精准。在维护方面，针对日常重复性工作，可以通过引入自动化工具，来实现基础数据和指标的自动收集和预警；针对复杂场景故障定位，可以引入 AI 技术，通过对历史问题的挖掘和根因规则的建立，实现故障的快速定位和预防预测。

## 3 5G 核心网面临的挑战

5G 核心网的演进采用了多种新技术，提升了网络能力；但是对于运营商来说，在创新应用与服务能力、网络成本和本地自主性把控等方面存在诸多挑战。

### 3.1 创新应用与服务能力不足

5G 引入服务化架构是一种全新的技术创新，其在网络业务层面进行了开放，有利于运营商通过细粒度的服务实现按需编排和升级，满足网络长期演进的需求。在 3GPP R15 规范中，给出了 NEF 的相关规范定义：作为 5G 网路能力开放功能，面向应用功能



▲图 2 5G 网络自动化、智能化流程示意

(AF) 提供了标准能力开放服务, 通过这些服务可提供服务质量 (QoS) 能力、事件监控、参数配置、设备触发、数据包流描述 (PFD) 管理、流量引导、背景流量以及策略计费等服务能力。然而, 当前产业进展仍然相对滞后, 5G 核心网服务化能力提供对内调用网络的能力, 无法满足业务对网络层能力、B 域侧能力、O 域侧能力等的服务化调用, 面对客户的行业类定制能力及场景化能力需求需要定制开发。

### 3.2 网络高成本

5G 核心网采用了云化部署方式, 但是并没有让运营商远离专用设备的复杂性和高成本, 而是将这些复杂性和高成本从硬件转移到软件上<sup>[10]</sup>。对于运营商来说, 网络云化是技术驱动的, 云计算技术的复杂性、IT 技术迭代升级的短周期, 以及网络 IT 人才的匮乏, 都使运营商面临更为复杂的技术问题, 而这些都只能依靠设备商来解决。这将给存量网络迁移和新网络的引入带来大量的成本压力。

设备商对于云操作系统 (CloudOS)、SDN 等技术的锁定, 存在系统的封闭性, 难以实现灵活的架构部署, 不利于实现共享, 会再次形成烟囱式部署; 建设和维护以及引入新功能成本较高, 也不利于自主创新以及灵活的迭代式部署升级。目前主流的 NFV 方案基本由设备厂商把持, 传统的 IT 方案厂商被边缘化, 根本的原因是 VNF 仍然由设备商来主导, 设备商需锁定自家的虚拟化软件才能保证性能和可靠性。

未来的 5G 通信云资源池部署既要考虑网络层次化架构, 又要充分利用云资源池集约化部署优点, 构建多云生态, 同时还需要考虑进一步降低网络内部耦合 (如 N4 接口), 推动网络的全开放性。

### 3.3 运营商自主性

无论是基础设施硬件、CloudOS, 还是上层的 5G VNF 应用, 目前均严重依赖于商用系统。网络内部集成和创新仍不尽如人意, 如云自身的灵活性仍难以发挥, 运营商无法自己完成网络云化迁移。

从对网络的控制角度来看, 运营商更像一个云租户, 而不是运营者。在网络软件化的时代下, 5G 网络建设需要向前一步, 直接面向用户和市场需求, 提供产品化的迭代创新能力, 以更好地服务一线运营。在采购同质化设备厂商产品的情况下, 运营商如果要比竞争对手更快响应市场, 提供更多的差异化服务, 并降低网络建设的成本, 需要更多地依赖于自身的创新和自主研发水平, 通过相关工具能力的建设, 提升网络和业务之间的协同效率。

5G 核心网使能网络创新, 是实现 5G 网络差异化的主要手段。5G 核心网的建设, 需要基于自主研发推进产品原型走向市场, 在运营中迭代更新, 并且要加快 IT 人员转型和人才队伍建设, 加速培养自主研发支撑力量。

### 4 结束语

5G 核心网技术演进带动了电信网络的转型。在网络转型的探索期中, 技术创新、商业模式和自主研发均面临着重重挑战。运营商需要坚持以服务客户为中心, 不断提升网络云化、开放化、自动化和智能化能力, 并通过提升自主研发力量自主掌控网络, 才能最终实现 5G 的商业愿景。

#### 参考文献

- [1] 5G 核心网云化部署需求与关键技术白皮书 [EB/OL]. [2020-04-08]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201806/P020180621513752479196.pdf>

- [2] 王卫斌, 朱进国, 王全. 5G 核心网演进需求及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 67-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202001015
- [3] 张亚飞, 阎东. 5G 核心网服务化架构研究 [J]. 信息通信, 2019(2): 226-227
- [4] MINOKUCHI A, ISOBE S. 5G core network standardization trends [J]. NTT DOCOMO technical journal. 2018, 19(3):
- [5] 李明轩, 董俊杰, 刘秋妍. 基于云原生的 5G 核心网演进解决方案研究 [J]. 信息通信技术, 2020(1): 63-69
- [6] Autonomous networks: empowering digital transformation for the telecoms industry [EB/OL]. [2020-04-08]. <https://www.tmforum.org/wp-content/uploads/2019/05/22553-Autonomous-Networks-whitepaper.pdf>
- [7] 张嗣宏, 左罗. 基于人工智能的网络智能化发展探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2019(2): 57-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.201902009
- [8] AI in network: use cases in China [EB/OL]. [2020-04-08]. <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/10/AI-in-Networks-Use-Case-V.03-231019-Document.pdf>
- [9] ENI-001 [EB/OL]. [2020-04-08]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/ENI/001\\_099/001/02.01.01\\_60/gs\\_ENI001v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ENI/001_099/001/02.01.01_60/gs_ENI001v020101p.pdf)
- [10] 纪光. 5G 核心网云化部署需求与关键技术 [EB/OL]. [2020-04-08]. <http://www.cww.net.cn/article?id=458654>

#### 作者简介



**赫罡**, 中国联合网络通信有限公司网络部副经理, 教授级高工; 主要研究领域为 5G 核心网及应用; 发表论文近 20 篇。



**苗杰**, 中国联合网络通信有限公司高级工程师; 主要研究领域为 5G 自动化、网络切片; 撰写专利近 10 项。



**董俊杰**, 中国联合网络通信有限公司高级工程师; 主要研究领域为 5G 自动化、智能化; 撰写专利近 10 项。

# MEC 的云边协同分析

## MEC Cloud-Edge Collaboration



杨鑫 /YANG Xin<sup>1</sup>, 赵慧玲 /ZHAO Huiling<sup>2</sup>

(1. 中国电信股份有限公司云计算分公司, 北京 100093;  
2. 工业和信息化部通信科技委, 北京 100035)

(1. China Telecom eCloud Corporation, Beijing 100093, China;

2. Communications Science and Technology Commission of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Beijing 100035, China)

**摘要:** 在业界云边协同应用场景和云边协同通用参考框架基础上提出移动边缘计算 (MEC) 云边协同参考架构, 分析了狭义 MEC 与广义 MEC 的云边协同不同点, 具体给出 MEC 边缘网络服务、边缘运营管理、云边平台服务、云边业务应用 4 大类的协同, 为运营商的 5G MEC 云边协同发展提供参考。

**关键词:** 移动边缘计算; 云边协同; 边缘计算

**Abstract:** A mobile edge computing (MEC) cloud-edge collaboration reference architecture based on application scenarios and general industry cloud-edge collaboration framework is proposed, and the cloud-edge collaboration differences between MEC in the narrow sense and MEC in the broad sense are analyzed. Four types of MEC cloud-edge collaboration including edge network services, edge operation management, cloud-edge platform services, and cloud-edge application collaboration are described in detail, which provides reference for 5G MEC cloud edge cooperative development of operators.

**Keywords:** MEC; cloud-edge collaboration; edge computing

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003006

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200619.1436.002.html>

网络出版日期: 2020-06-19

收稿日期: 2020-05-13

随着 5G 独立组网 (SA) 的正式建设, 作为 5G SA 核心能力之一的移动边缘计算 (MEC)<sup>[1]</sup> 也正式启动商业部署和运营。虽然 MEC 试点已开展较多, 但其作为一个 IT 和 CT 融合平台, 存在多重挑战<sup>[2]</sup>。充满不确定性但似乎又有无限可能, 这既是 MEC 让人困惑之处, 也是 MEC 被寄予厚望之处。全球电信运营商对 MEC 的技术选择与商业运营思路并不完全相同, 对于将云计算作为战略型业务发展的主导运营商来说, MEC 不仅仅是 5G 边缘计算平台, 还普遍被认为是云战

略的重要差异化优势之一。MEC 与中心云协同为客户提供云网边一体化服务成为必然选择。

### 1 云边协同应用场景

除了少数在边缘节点终结处理的业务 (如部分园区私有云业务) 外, 对于大部分边缘计算业务来说, 云边协同的业务需求普遍存在。边缘计算产业联盟和云计算开源产业联盟总结了内容分发网络 (CDN)、工业互联网、能源、智能家庭、智慧交通、安防监控、农业生产、医疗保健、云游

戏等云边协同应用场景<sup>[3-4]</sup>。其中, 有的是因为业务低时延需求, 在业务系统云端部署的同时将部分时延敏感实时处理任务下沉到边缘, 如工业大数据在云端综合分析处理时可编程逻辑控制器 (PLC) 采集数据在边缘实时分析处理与控制设备; 有的是着眼于降低云端计算压力和网络带宽成本, 如 CDN 应用场景在边缘部署缓存和计算服务, 提供边缘加速或作为 CDN 的进一步下沉节点, 以在降低总体成本的同时提升用户的就近服务体验; 有的则综合时延、成本、性能、可靠性等,

以实现系统架构的优化并充分发挥云与边的不同优势,如视频安防监控中涉及到视频人工智能(AI)的应用处理,它通过在边缘的视频预分析和AI推理执行,实现视频监控场景实时异常事件的感知及快速处理,在云端则发挥云端算力、开发工具的优势,完成AI模型的训练以及AI分析应用的开发并按需下发给边缘部署。

## 2 云边协同参考框架

边缘计算产业联盟认为云边协同包含云端与边端基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)、软件即服务(SaaS)的多种协同<sup>[3]</sup>,边端边缘计算(EC)-IaaS与云端IaaS应可实现对网络、虚拟化资源等的资源协同;边端EC-PaaS与云端PaaS应可实现数据协同、智能协同、应用编排协同、业务管理协同;边端EC-SaaS与云端SaaS应可实现应用服务协同。云计算开源产业联盟则进一步提出在IaaS资源、PaaS平台、SaaS应用的协同基础上面还需要考虑计费、运维、安全等方面的协同<sup>[4]</sup>。

华为作为信息与通信技术(ICT)产业的设备与服务提供商,在边缘计算领域的布局涉及“云、管、边、端、芯”。其中,华为云提出基于Kubernetes扩展的云边协同开源项目——KubeEdge<sup>[5]</sup>,并将其贡献给云原生计算基金会(CNCF)。作为一个智能边缘平台,KubeEdge包含了边端的计算节点部分和云端的管理控制部分,其云边协同体现在:1)基于WebSocket和Quic协议构建了可靠、高效的云边消息通信,并作为云边控制协同、数据协同的通信基础;2)扩展了Kubernetes,实现云边协同编排管理,包括基于云端的边缘控制器EdgeController等控制Kubernetes应用程序编程接口(API)服务器与边

缘节点、应用和配置的状态同步,支持直接通过kubectl命令行在云端管理边缘节点、设备和应用;3)提供了DeviceTwin模块,实现边缘计算节点下挂的边缘设备与云端设备管理之间的同步和控制。

作为云服务提供商,阿里云也进军了边缘计算领域,并积极布局云边协同:1)发布了边缘节点服务(ENS)<sup>[6]</sup>。ENS当前主要提供边缘IaaS服务,但其目标是建立大规模分布式边缘算力融合调度平台,融合虚拟机、容器、函数、流式计算等计算形态,屏蔽分布在各个边缘数据中心(DC)硬件环境与网络环境的异构差异,无缝支持各类边缘资源,为规模覆盖的云边一体化计算提供底座能力支持。2)与华为类似,基于“云端统一管控,边缘适度定制”的理念,阿里云将Kubernetes容器服务拓展至边缘,推出边缘容器产品——阿里云容器服务Kubernetes版ACK Edge Kubernetes<sup>[6]</sup>,并提供了云边协同通道——EdgeTunnel,实现云端管控与边缘worker节点之间的消息交互。同时,阿里云还重点考虑了边缘节点日志监控运维、边缘应用编排管控的云边协同需求。ACK Edge Kubernetes可以认为是边缘PaaS服务。

## 3 MEC 的云边协同

行业联盟的边缘计算云边协同参考框架是针对业界各种边缘计算的一个总体参考,而边缘计算却存在多种形态。华为和阿里在各种边缘计算产品中也给出了针对性的云边协同设计与研发实现。对于MEC,其云边协同架构总体符合业界的参考框架,同时也有自身需要重点关注的问题。

目前,MEC有广义和狭义之分。狭义的MEC指遵循ETSI标准架构的多接入边缘计算平台<sup>[1]</sup>,该平台一般基于网络功能虚拟化(NFV)和管理

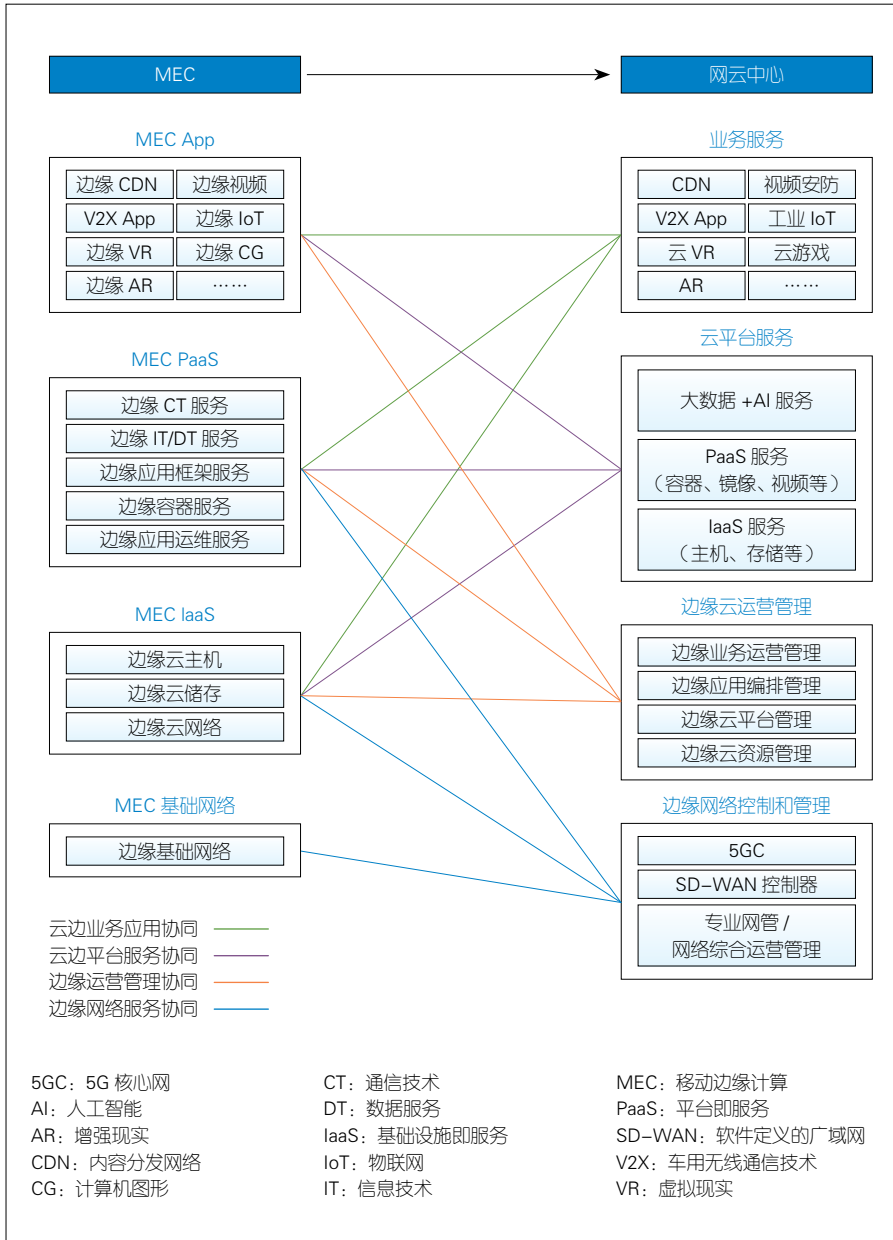
编排技术构建,5G用户面功能(UPF)被纳入MEC系统中统一考虑。广义的MEC则指运营商在网络边缘部署边缘计算平台,特别是对于自身提供公有云和CDN服务的运营商,可以基于自身的公有云和CDN资源延伸打造MEC平台(不一定命名为MEC平台),该平台一般与UPF分离部署。在边缘云技术层面,该平台虽然与网络功能虚拟化基础设施解决方案(NFVI)有共通之处,但其并不完全遵循NFV的架构和标准,而是有一套互联网化的边缘计算平台。综上所述,MEC云边协同参考架构如图1所示,分为4个层面的云边协同。

### 3.1 MEC 边缘网络服务协同

1)边缘承载网络协同。MEC的边缘资源池与中心云资源池之间的云边网络互联,主要基于城域网/移动承载网+IP骨干网承载(理想的状态是基于软件定义网络/SD-WAN实现云、边之间的网络资源统一调度)。近期,云边网络互联以跨网络隧道技术为出发点进行构建<sup>[8]</sup>,例如以软件定义广域网(SD-WAN)为代表的Overlay方案和SRv6为代表的Underlay方案等。这些方案均通过云端集中部署的SD-WAN控制器和网络运营管理系统实现云边网络之间Overlay与Underlay连接的资源调度,满足云边业务应用协同等网络需求。

2)5G核心网网络协同。无论MEC与UPF是否物理集成部署,两者在运营层面需要统一打造“连接+计算”的对外服务。MEC的云边协同连接包括UPF与5G核心网控制面的网元,特别是会话管理功能(SMF)与网络开放功能(NEF)之间交互。当前,UPF与SMF之间仍然是厂商私有接口。中国移动提出“OpenUPF合作伙伴计划”<sup>[9]</sup>,面向垂直行业场景制定





▲图1 MEC 的云边协同参考架构

标准 N4 接口，打造开放的行业 UPF，以更好地支持企业现场等场景的 MEC/UPF 部署。

### 3.2 MEC 边缘运营管理协同

MEC 的边缘运营管理主要包括边缘云资源管理、边缘云平台管理、边缘应用编排、边缘业务运营管理，均是对边端不同层面的集中云端管控。狭义和广义 MEC 的边缘运营管理协同

存在较大差异。

对于狭义 MEC，MEC/UPF 与边缘编排和网络管理 (MANO) 实现云边协同管理交互。边缘 MANO 参考 NFV MANO 标准并基于边缘特性进行定制和扩展<sup>[10]</sup>，实现云端的应用编排和分发，并对边端 MEC 平台和应用实现集中化的资源管理和监控运维等。相比标准 MANO，边缘 MANO 的主要定制化包括：1) 优先采用轻量化

VIM，可与计算节点合设，以尽可能减少边缘节点资源开销；2) 提供单独的移动边缘应用编排 (MEAO) 系统，实现 MEC 应用编排。MEAO 提供全局统一的 MEC 资源管理、编排和调度，提供移动边缘 (ME) App 应用软件包管理及 App 生命周期管理，并可与 5G 核心网的 NEF 或 PCF 交互，实现分流规则的设置。

对于广义 MEC，基于 Kubernetes 和容器提供边缘容器集群服务成为主流选择，边缘容器集群可以构建在轻量级 Openstack 和虚拟机/裸金属服务器之上。边缘集群形态分为云端管控集群和边缘分布集群两类。对于云端管控集群，Kubernetes master 节点在云端，node 节点在边缘端。云端管控集群适用于边缘资源较少的情况，例如华为 KubeEdge 以及阿里 ACK Edge Kubernetes。对于边缘分布集群，kubernetes master 和 node 节点均在边缘端，边缘部署一个完整的 Kubernetes 简化版本。边缘分布集群中，云端针对多集群进行管控，适用于边缘规模较大的情况，例如 Rancher K3S<sup>[11]</sup>。

无论是狭义还是广义 MEC，我们都要考虑边缘业务运营协同，包括在云端提供边缘应用开发测试环境 (重点包括 MEC 能力的调用支持)、边缘应用商城与镜像仓库、边缘应用的安全认证、边缘应用的能力调用计费日志查询等服务。在边端，基于云端编排调度加载边缘应用软件包并进行可信执行，从而对边缘应用提供 MEC 能力和服务使用计费日志服务。

### 3.3 MEC 云边平台服务协同

MEC 云边平台服务协同主要是指 MEC 与公有云上的各种云平台服务与边缘服务形成协同，包括为边缘应用提供云端能力的调用交互，以及将云

端能力延伸下沉到边缘云，作为一个服务在本地为边缘应用提供服务。这种本地服务可以根据场景按需部署，在云边协同场景中需求较多的云边平台服务包括视频类、AI类、物联网大数据类。理想情况是，公有云的计算和存储等云计算基础服务与 MEC 形成云边一体，即让计算和数据在云边自由流动，云端租户虚拟机可以调度迁移至边缘，并基于业务需求、计算负载等实现云边算力的统一调度；而云端存储与边缘存储可以基于策略统一调度，实现热点数据的边缘存储、全量数据和结构化分析数据的云端上传、保存等。对于狭义的 MEC，基于 NFV 的边缘云运营管理和公有云运营管理是两套体系，云边协同需要两个体系对接。对于广义上的 MEC，边缘云运营管理和公有云运营管理是一套体系，即 MEC 云边平台服务协同真正形成一体，并为上层业务应用屏蔽底层云边网络与资源、能力的差异。其未来的技术发展目标是类似于无服务器（Serverless）的概念，MEC 云边协同为应用提供无边感知（Edgeless）平台服务。这是狭义 MEC 与广义 MEC 的最大区别之一。

### 3.4 MEC 云边业务应用协同

云边业务应用协同主要指业务应用自身的云边协同，具体包括业务应用部分处理任务作为一个边缘应用下沉到 MEC；云端业务应用从 MEC 边缘云 IaaS 和 PaaS 获取边缘应用状态及日志等信息并进行集中分析，对边缘应用实例、边缘云资源、边缘平台能力等进行策略调度。MEC 云边协同体系的最终是为了支持上层业务应用实

现计算的最佳分布，MEC 云边业务应用协同的理想状况是云端业务应用根据用户请求分布、自身算力负载以及业务需求体验实现部分处理任务按需下沉到 MEC，对用户终端访问请求精准调度到 MEC，并触发边缘云和边缘网络资源的调度与保障，实现业务应用的计算效率、客户体验、网络成本的最佳分布组合。

## 4 结束语

云边协同是 MEC 发展过程中面临的重要问题，不同运营商有不同的选择。在美国，主导运营商与公有云巨头之间开展了 5G 云边协同的合作，如 Verizon 与 AWS 的合作——AWS Wavelength 平台，它提供了 5G 边缘网络和数据中心的基础设施服务，而两者主要进行边缘网络的协同。运营商与外部公有云服务提供商之间是多云网合作。同时，AWS 也和 Vodafone、SK Telecom 和 KDDI 等运营商进行合作，将 Wavelength 区域扩展到更多地方。与美国不同的是，中国运营商正在大力发展自有的公有云业务，MEC 云边协同的含义非常丰富。运营商的 MEC 云边协同策略有多种选择，如何助力运营商进行云网融合战略同时又能够实现产业共赢，将是运营商 5G MEC 成功与否的重要衡量标准之一。

### 参考文献

- [1] ETSI. Multi-access edge computing (MEC) [EB/OL]. [2020-04-03]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing>

- [2] 杨鑫, 赵慧玲. 多接入边缘计算 MEC 技术及业务发展策略 [J]. 移动通信, 2019, 43(1): 29-33. DOI: CNKI:SUN:YDTX.0.2019-01-007
- [3] 边缘计算产业联盟. 边缘计算与云计算的协同白皮书 [R]. 2018
- [4] 云计算开源产业联盟. 云计算与边缘计算协同九大应用场景 [R]. 2019
- [5] CNCF. KubeEdge, an open platform to enable edge computing [EB/OL]. [2020-04-03]. <https://kubeeedge.io/>
- [6] 阿里云. ENS 边缘节点服务 [EB/OL]. [2020-04-03]. [https://help.aliyun.com/document\\_detail/63837.html?spm=5176.cn-ens.0.0.21a942fb72HwGf&aly\\_as=niTfaW8BM](https://help.aliyun.com/document_detail/63837.html?spm=5176.cn-ens.0.0.21a942fb72HwGf&aly_as=niTfaW8BM)
- [7] 阿里云. 边缘容器 ACK Edge Kubernetes [EB/OL]. [2020-04-03]. <https://developer.aliyun.com/article/703032>
- [8] 边缘计算产业联盟. 运营商边缘计算网络白皮书 [R]. 2019
- [9] 中国移动研究院. 5G OpenUPF 白皮书 [R]. 2020
- [10] ETSI. Mobile edge computing (MEC); deployment of mobile edge computing in an NFV environment: ETSI GR MEC 017 V1.1.1 [S]. 2018
- [11] Rancher Labs. K3S [EB/OL]. [2020-04-03]. <https://k3s.io/>
- [12] AWS. Wavelength [EB/OL]. [2020-04-03]. <https://aws.amazon.com/cn/wavelength/>

## 作者简介



杨鑫，中国电信云计算分公司技术中台部副总经理；主要研究领域为 5G 云化网络、云原生、视频云等技术与业务平台；已发表论文 20 余篇，授权专利 10 余项。



赵慧玲，工业和信息化部科技委专职常委、信息通信网络专家组组长，中国通信学会常务理事、信息通信网络技术专业委员会主任委员，中国通信学会北京通信学会副理事长，中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作委员会主席，中国电信科技委常委兼核心网组负责人，SDN、NFV、AI 产业联盟技术委员会副主任，网络 5.0 产业联盟技术委员会副主任；曾获国家及省部级多个科技进步奖项；发表论文 100 余篇，出版技术专著 12 部。

# 硬件加速在核心网转发面应用的思考和实践

## Thinking and Practice of Hardware Acceleration in Core Network Forwarding Application

王升 /WANG Sheng, 班有容 /BAN Yourong, 陈佳媛 /CHEN Jiayuan, 张昊 /ZHANG Hao

(中国移动研究院, 北京, 100053)  
(China Mobile Research Institute, Beijing 100053)



**摘要:** 5G、边缘计算新型业务对带宽和时延的需求要求核心网用户面功能 (UPF) 具备低时延、高转发、零丢包的能力, 对动态调整、定制化以及切片的需求又要求 UPF 进行虚拟化部署。通过对网络功能虚拟化 (NFV) 不匹配三角的深层次分析, 找到 UPF 应用硬件加速的切入点, 并通过加速比公式衡量硬件加速的效能, 为后续性能提升指明方向。认为运营商可以通过定制化、标准化服务器和智能网卡的选型与规格, 实现 UPF 软硬解耦, 打造通用、开放的网络资源池, 充分利用通用硬件的池化效应, 降本增效, 在提升资源利用率的同时加强运营商对网络的自主掌控。

**关键词:** UPF; 智能网卡; 硬件加速; 软硬解耦

**Abstract:** The high demand of bandwidth and delay from new services of 5G and edge computing requires user plane function (UPF) should have the ability of low delay, high forwarding and zero packet-loss. And virtualized deployment is also needed by dynamic adjustment, customization and network slicing function. Through the deep analysis of network function virtualization (NFV) mismatched triangle, the pointcut of hardware acceleration in the UPF is found. The acceleration ratio formula can not only measure the performance of hardware acceleration, but also indicate the direction of subsequent improvement. Now the UPF equipment in the industry is proprietary to manufacturers, and the combination of software and hardware is highly enclosed. Operators can realize the decoupling of software and hardware of UPF through customized and standardized server and SmartNIC selection and specification. The general and open network resource pool makes full use of the pooling effect of general hardware, reduces costs, increases efficiency and improves resource utilization while strengthening the operator's autonomous control of the network.

**Keywords:** user plane function; SmartNIC; hardware acceleration; hardware-software decoupling

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.1001.004.html>

网络出版日期: 2020-06-22

收稿日期: 2020-04-16

### 1 硬件加速起源于不匹配三角

如同经济学领域有蒙代尔的不可能三角、分布式计算有 CAP (指一致性、可用性、分区容忍性) 公理一样, 网络功能虚拟化 (NFV) 也存在不匹配三角: 计算、带宽和存储三者中总

会有一方发展较慢。木桶理论中提到, 最短木板决定了系统性能, 因此, 解决 NFV 不匹配三角问题, 是硬件加速在 NFV 领域存在的基石。

随着虚拟化和微服务架构的兴起, 完成一个业务所需的东西向流量急剧增加。伴随众多网络业务发展、

4G 不限量套餐普及及 5G 的兴起, 南北向业务流量也在急速增长。这是近两三年来, 数据中心机房迅速从 10 G 网卡提升到 25 G 光纤网卡并向 100 G 网卡演进的深层次原因。随着网络带宽增长势头加剧, 计算处理能力的短板逐渐凸显; 因此, 人们急需一种技

术方案来弥补这个短板。

硬件加速即利用中央处理器（CPU）、片上系统（SoC）、图形处理器（GPU）、数字信号处理器（ASIC）、现场可编程门阵列（FPGA）等使用不同类型指令集和不同体系架构的计算单元，组成一个混合的计算系统，通过将处理工作分配给加速硬件以减轻CPU负荷的技术，从而实现性能提升、成本优化的目标。当前，业界为了解决算力短板、满足业务密集计算需求、提升业务处理性价比，广泛使用各种加速硬件。例如，Azure、AWS等公有云推出的FPGA、GPU实例，Google推出全新架构的张量处理器（TPU）芯片，京东云、阿里云为提升网络性能使用的开放虚拟交换（OvS）卸载智能网卡等。

技术的发展如同历史的发展一样，总是螺旋式上升的。在CT领域，NFV通过使用X86等通用性商用货架产品（COTS）硬件以及虚拟化技术来承载网络功能的软件处理，使网络设备功能不再依赖于专用硬件、资源可以充分灵活共享，实现新业务的快速开发和上线，并基于实际业务例如，需求进行自动部署、弹性伸缩、故障隔离和自愈等；然而，面向5G、边缘云移动边缘计算（MEC）新兴业务如增强现实（AR）/虚拟现实（VR）、云游戏、人工智能（AI）等计算、输入/输出（I/O）、网络密集型应用时，单纯使用COTS硬件并不能满足这些应用对低时延、高可靠的网络要求与并行计算的算力要求。如果采用服务器堆叠方式解决以上问题，总体上将增加资本支出（CAPEX）和运营成本（OPEX）压力。在一些边缘计算场景，机房有限的空间、承重、电力、散热条件制约着可承载服务器的数量。本文中，我们的研究重点是针对负责网络转发的用户面功能

（UPF），提升其单位空间、能耗下的转发性能，打破计算与带宽的不匹配三角，实现通用X86服务器架构下的更高转发性能。

## 2 核心网网关转发的瓶颈与引入100 G网卡的趋势

随着后摩尔定律时代到来，CPU制程迭代变缓，主频和单位面积芯片中可容纳的核/缓存数量提升变得困难。目前，CPU三级缓存的存取效率已经从30 ns提升到10 ns左右，将共享三级缓存近核本地化和按需分配仅可以有限地提升缓存利用效率，性能进一步提升难度较大。

在核心网网关UPF中，对一个报文的处理至少需要读（查找转发表）、写（计费）缓存各一次。CPU缓存是最大的I/O瓶颈，过多缓存丢失引起的读写内存会引发转发能力螺旋式下降<sup>[1]</sup>。I/O效率在100 G线速下几乎是不可逾越的瓶颈，因此，如何减少业务处理逻辑对CPU缓存的访问、将流表卸载至加速硬件中，是产业界尝试打破转发瓶颈的一个方向。

在提速降费、不限量套餐普及以及5G业务发展的大背景下，核心网中数据流量剧增。在4G话务模型下，虚拟化核心网网关用户面（GW-U）部署的普通双路服务器，一般会配置两块25 G网卡——不跨非统一内存访问架构（NUMA）节点。在实际商用部署中考虑到CPU毛刺等因素，理想状态下一台服务器的最大安全吞吐量约40 G。5G增强移动宽带（eMBB）场景下，单局容量远超4G。提高单服务器转发能力，降低服务器总量从而降低能耗和管理成本是当务之急；因此，网卡向100 G发展是必然趋势。若使用100 G智能网卡，由于转发流量卸载到智能网卡，CPU冲高影响降低，在确定的话务模型下，理想最大安全

吞吐量可达95 G，折扣大大降低，使总体转发能力提升约4~5倍。同时，针对5G的超可靠低时延通信（URLLC）场景，智能网卡转发处理的平均时延约为10 us，较之NFV软件处理的平均时延100~200 us，可降低一个量级。100 G智能网卡在4G核心网（EPC）、5G eMBB和5G URLLC场景下，成本和时延优势明显。

## 3 UPF应用智能网卡的切入点

如图1所示，5G采用控制面与用户面（C-U）分离架构，UPF作为U面对外接口是无线侧N3和互联网侧N6，其中N3接口采用GPRS隧道协议（GTP）协议封装。

业界一度对核心网NFV的U面是否需要加速持怀疑态度<sup>[2]</sup>，认为：

1）通用硬件平台虚拟化是大势所趋，运营商刚从专用设备中转型脱身，智能网卡似乎又回到了熟悉的专用硬件，这是倒退；

2）硬件加速效能比达不到预期。

专用设备被诟病的主要原因在于设备商垄断造成了高昂成本。当前，核心网硬件加速的成熟应用主要聚焦在加解密、编解码等领域。性能提升和成本下降有限，同时引入加速硬件可能带来的硬件绑定问题，使运营商难以下定决心；因此，在加速硬件技术方案的选择上，需要平衡当前通用与专用之间的矛盾。业界常见的加速硬件主要有5类，表1在成本、功耗、开发难度和重用性以及适合的数据处理类型等方面对这5类加速硬件进行了对比。

在成本、功耗和开发难度上，数字信号处理器（ASIC）方案具有绝对优势；但是其支持的加速功能固化，芯片不可重用，灵活性低，更适合成熟稳定的算法类应用。

GPU是面向视频处理等大规模并

行计算类型领域的成熟方案，软件生态强大。边缘云业务中涉及到视频数据处理（渲染、转码）以及 AI 的推理、训练处理都采用 GPU 实现。

NPU 提供一定的转发规则可配置能力，通过对数据报文转发处理主要过程的固化，实现高性能数据转发，是高性能路由平台的主要方案。

SoC 具有可编程、可升级、支持热补丁特点，多为进阶精简指令集机器（ARM）架构，一般配合 ASIC 定制化使用以保证性能，适合较成熟稳定的算法类应用。

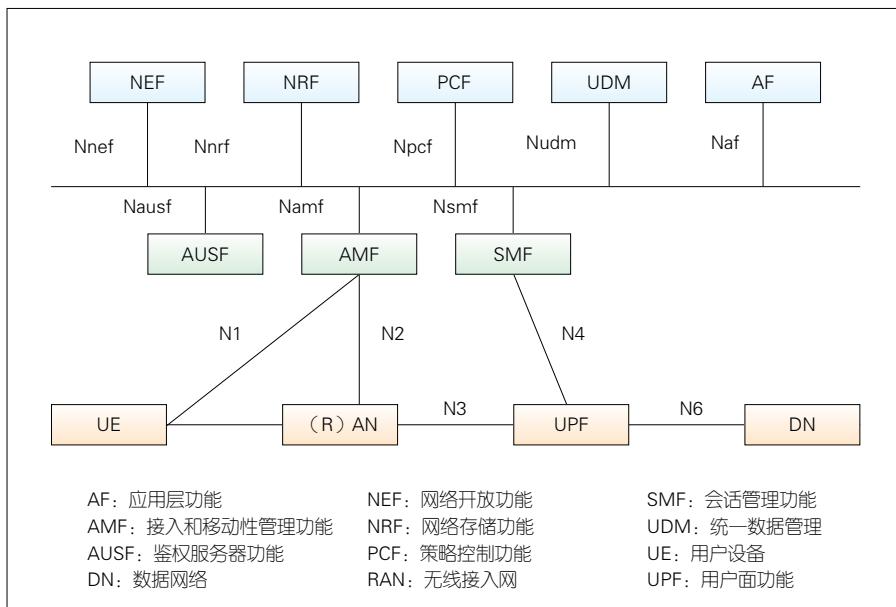
FPGA 性价比介于通用处理器和

ASIC 之间，同时处理时延低，契合 5G URLLC 场景。EPGA 灵活性高，可在线重加载配置软件以实现不同的功能特性，并且片上资源可灵活划分。随着 FPGA 处理能力的提升，FPGA 的部分重配置（PR）技术可以将一块 FPGA 配置为多块功能单元，比如各单元分别支持流量卸载、视频编解码和机器学习。同时每一个功能单元，还可以通过单引导 I/O 虚拟化（SR-IOV）方式提供给多个上层业务来使用，以充分发挥 FPGA 设备性能。实现网络加速的智能网卡是 FPGA 芯片的一种典型应用，这也是数据转发类加速硬

件的一个重要形态。

UPF 加速要想做到硬件资源池化，须面临软软解耦（即网元通过应用程序编程接口调用加速硬件的加速功能）或软硬解耦（网元软件在统一的加速硬件上进行功能迭代）的选择。目前 UPF 硬件加速产业并不成熟，各厂家网元处理流程设计不同，加速卸载方案多样。在这一阶段我们选择软软解耦方案，需要统一卸载功能模块及处理流程，打开业务接口。这样的话，一方面难以发挥各种加速硬件优势，另一方面当软件功能升级时，拆分到硬件和上层软件的功能协同升级也较为复杂，同时功能模块的拆分也会为运维、故障定位带来困难；因此，软软解耦是未来产业成熟后的远期目标。针对软硬解耦方案，需要选择一类加速硬件由 UPF 厂家适配开发。5G 业务对高吞吐、低时延的需求分析，与卸载功能和流程需要不断优化演进的需求，都要求加速芯片在保证并行处理能力和低时延性能的基础上具备高度灵活性。综上所述，FPGA 芯片是一种更为灵活、成熟、可通用化部署的选择。

在图 2 所示的 UPF 业务处理模型中，GTP 封装 / 解封装、规则查找、DPI、服务质量（QoS）、计费是关键业务处理路径。如果加速硬件仅处理转发动作，所有报文仍需 CPU 处理



▲图 1 5G 核心网基础架构

▼表 1 常见加速硬件对比

加速硬件	FPGA	GPU	NPU	ASIC	SoC
成本	中	高	低	低	中
功耗	中	高	低	低	中
开发难度	高	中	中	低	高
可重用性	支持	支持	不支持	不支持	支持
典型应用	计算密集算法； 规模并行处理； 大容量数据转发	视频数据处理； 规模并行处理	大容量数据转发	计算密集算法	计算密集算法； 大容量数据转发
主流厂商	Xilinx/Intel	NVIDIA/AMD	华为	Intel/Mellanox	Marvell/Mellanox/ 华为
主流形态	按需定义	PCIe 标卡	主板级	按需定义	按需定义

ASIC: 数字信号处理器  
FPGA: 现场可编程门阵列

GPU: 图形处理器  
NPU: 网络处理器

PCIe: 外设部件互连标准  
SoC: 片上系统

GTP 协议、QoS、计费等业务，这一加速应用模型对于 UPF 性能的提升有限；因此，UPF 加速模型须考虑尽可能实现报文的全业务处理卸载。

ETSI NFV001 定义了硬件加速的 3 种主要模式<sup>[3]</sup>，如图 3 所示。

1) Look-Aside: 旁路模式，类似协处理器的应答模式，不改变现有软件流程；

2) In-Line: 随路模式，嵌入到软件的包处理过程中，是一种紧耦合模型

3) Fast-Path: 快路径模式，报文不经过主机处理。

对于 UPF 这类转发面网元，Look-Aside 模式中数据包要在加速卡和中央处理器之间多次传递，对总线带宽和处理时延均有影响。In-Line 模式和 Fast-Path 模式更适合业务功能的有效卸载。因此数据包由网卡接收后可以直接在本地处理的智能网卡比旁路外设部件互联标准 (PCIe) 加速卡更适合用于 UPF 加速。

使用 FPGA 智能网卡对现有 NFV

架构的主要影响包括网元适配开发和管理和编排 (MANO) 纳管。FPGA 开发基于硬件编程语言 VHDL 或 Verilog，与硬件紧耦合。在 NFV 模式下，多 UPF 厂商多智能网卡配对，UPF 厂家适配开发工作量需要收敛。在 OpenStack 社区，Cyborg 组件可以实现 FPGA 智能网卡的发现、管理以及加速功能加载。FPGA 智能网卡需要支持通过 Cyborg 实现自动化在线重配置。基于降低适配开发工作量、UPF 加速业务快速上线、满足在线自动重配的需求，FPGA 智能网卡需要支持静态 - 动态区域模式，并需要运营商对智能网卡进行统一定制化设计。

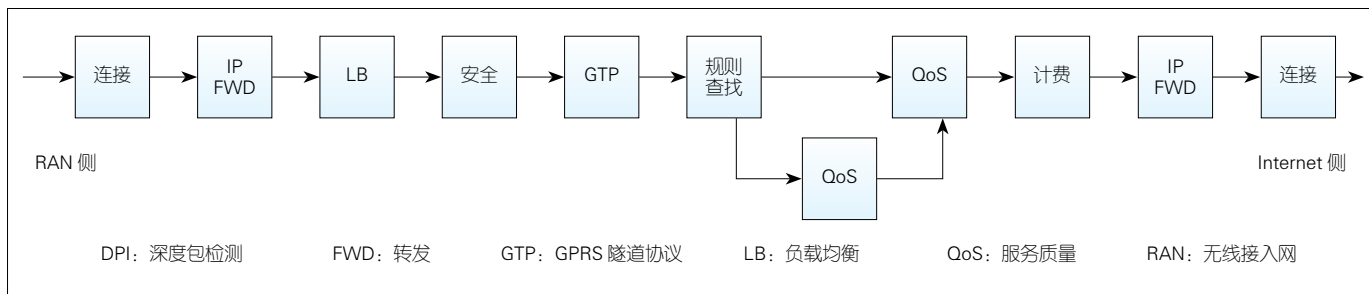
在 FPGA 智能网卡的静态 - 动态区域模式中，静态区域需要封装 PCIe 接口、双倍数据传输速率 (DDR) 控制器等通用 IP，面向动态区域提供调用接口，由硬件厂家预先完成开发调试，UPF 厂家在动态区域进行功能开发时可以直接获得硬件平台能力。由硬件厂家提供静态区域，用户则无法

修改，这为设备稳定、可靠提供保障，也可形成 FPGA 用户到服务器的隔离，提供安全保证。动态区域部分加载的 UPF 加速逻辑，由网元厂家开发设计，可动态更新，使网元加速功能开发更专注于业务逻辑，也便于后续网元的功能迭代。这一模式为 FPGA 的安全、可靠提供保证，同时使 FPGA 使用者专注于业务逻辑开发，降低了 FPGA 开发难度。

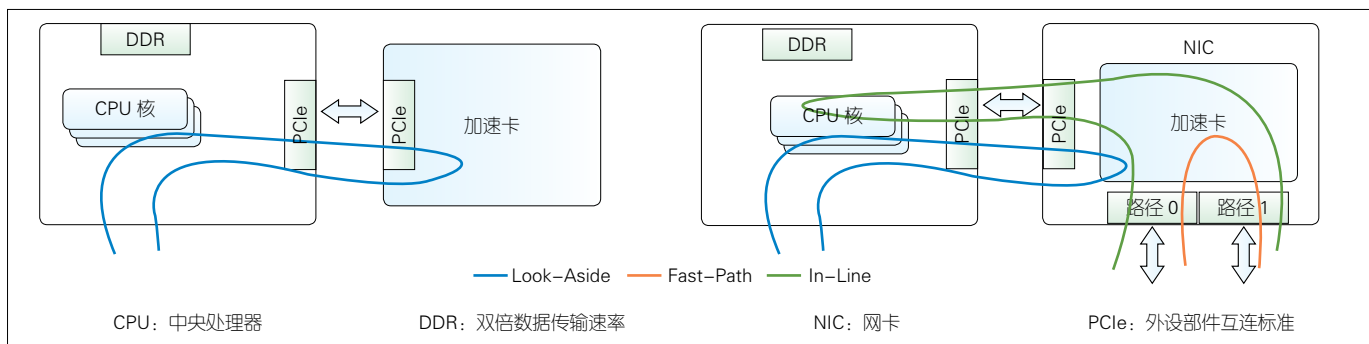
#### 4 智能网卡业务卸载参考设计

考虑到智能网卡更适合处理逻辑简单的重复并行业务，在进行卸载功能选择时，原则上选择稳定且逻辑简单的功能卸载，卸载功能处理流程须符合 In-Line 或 Fast-Path 模式。使用 In-Line 模式时，我们需要考虑哪些功能必须由 CPU 处理，哪些适合下沉到智能网卡。对于 Fast-Path 模式，我们需要考虑满足了哪些条件后，报文可以不经过 CPU，完成正确的转发和计费。

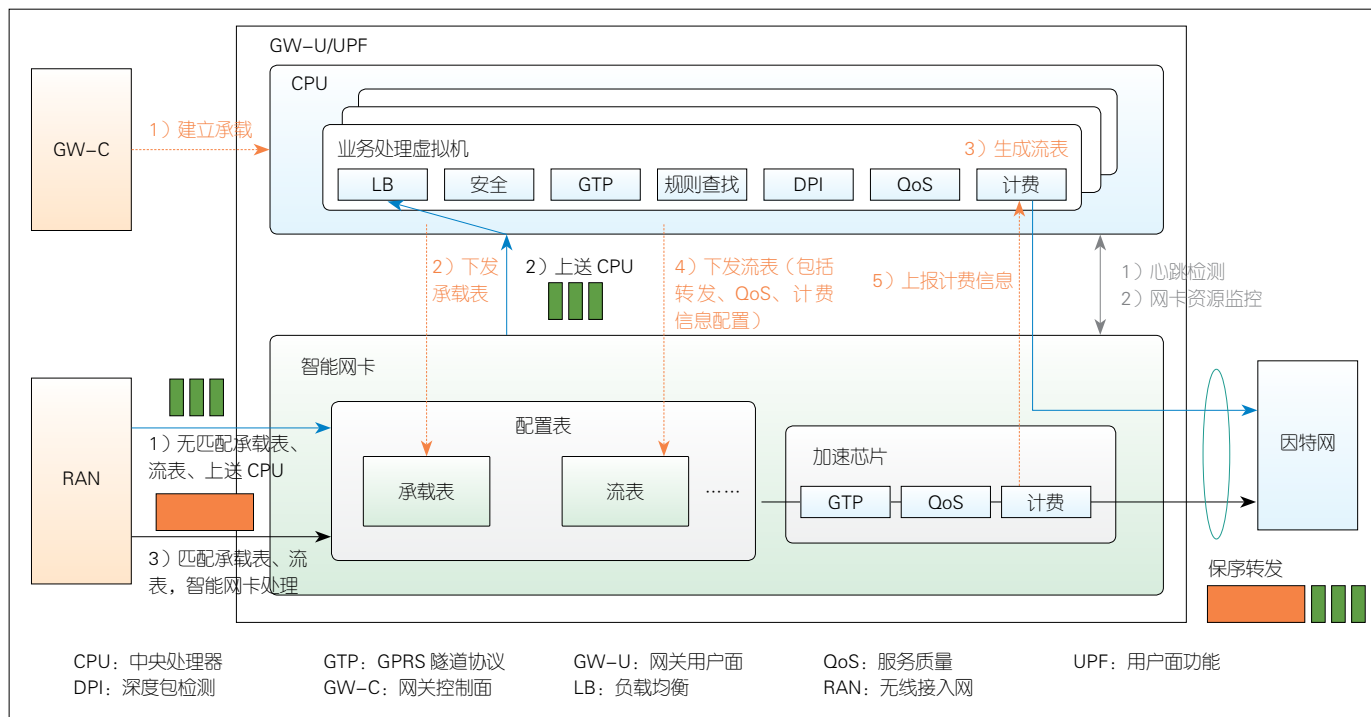
图 4 给出了一种 UPF 业务卸载的



▲图 2 用户面功能业务处理模型



▲图 3 硬件加速模式



▲图 4 UPF 硬件加速参考设计

参考设计，其中配置下发和计费等信息上送均通过流表完成。表 2 给出了 CPU 下发的部分配置流表设计。

1) 通过首包（一个或几个）上送 CPU，CPU 生成配置流表下发给智能网卡，流表中含路由、计费策略等内容；

2) 后续报文到达，智能网卡查找流表，命中则直接转发，不再经过 CPU 处理，未命中上送 CPU；

3) 智能网卡实现 GTP 报文的封装 / 解封装等处理；

4) 根据计费等策略，智能网卡把计费等信息上报 CPU。

### 5 加速比是衡量硬件加速效能的关键指标

阿姆达定律定义了多核计算的加速比，其核心思想是可并行计算的模块占比与核的数量之间的关系。类似地，衡量硬件加速的效能，也可采用加速比这个概念；但不同之处在于使用了“可卸载报文比例”作为关键因子。

▼表 2 流表参考设计

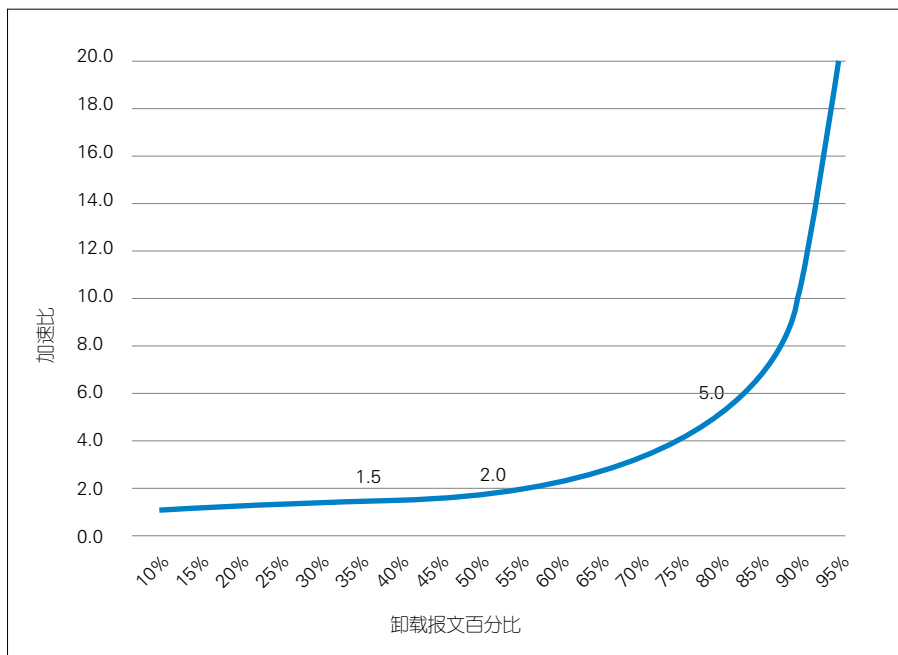
类别	字段	大小	说明
五元组	IPType	1	IPv4/IPv6
五元组	UserIP	128	用户 IP 地址
五元组	PDNIP	128	PDN IP 地址
五元组	UserPort	16	用户端口
五元组	PDNPort	16	PDN 端口
五元组	ProType	8	协议类型
五元组	innerDSCP	6	内层报头 TOS
路由	srcMac	48	源 MAC
路由	dstMac	48	目的 MAC
计费	ulAccPakNum	12	上行报文数
计费	ulACCVol	20	上行报文长度
计费	dlPakNum	12	下行报文数
计费	dlACCVol	20	下行报文长度
计费	Type	3	计费上报方式
VLAN	vlanType	1	VLAN 类型
VLAN	vlanID	12	VLAN ID
隧道	outerDSCP	6	外层隧道 TOS
隧道	tunnelType	2	默认 GTP
隧道	tunnelIPType	1	IPv4/IPv6
隧道	tunnelLocollP	128	隧道本端地址
隧道	tunnelPeerIP	128	隧道对端地址
隧道	localTEID	32	隧道本地 ID
隧道	peerTEID	32	隧道对端 ID

注：实际实现时，流表会根据业务需求进行优化，如承载 / 流 / 计费拆分等等，此处仅供参考。

GTP: GPRS 隧道协议  
ID: 身份标识

MAC: 介质接入控制  
PDN: 公用数据网

TOS: 服务类型  
VLAN: 虚拟局域网



▲图5 加速比变化趋势

加速比的定义如公式(1)所示:

$$Y = 1/(1-X) \quad (1)$$

其中  $X$  为可卸载报文比例。

例如, 卸载 80% 的报文时, 加速比为  $1/(1-80\%)$ , 即 5 倍。这意味着一台服务器可以处理原来 5 台服务器处理的报文。

图 5 展示了加速比的变化趋势: 目前多数加速应用卸载比例约为 35%, 效能比低于 1.5。当卸载 50% 的报文时, 加速比为 2 倍, 这个数值是加速比的拐点。当卸载比例超过 50%, 加速比将大幅提升。

在实际转发流量中, 我们把超文本传输协议 (HTTP) 访问称为“短流”, 把视频类流称为“长流”。“长流”持续时间长、报文数量多。显而易见, “长流”可以获得更高的加速比。随着 5G 和视频应用的普及, 视频流量的比例将大幅提升, 并达到个人用户上

网流量的 80%、行业流量的 70%, 同时智能网卡卸载加速的效果将会更加显著。

硬件加速的加速比存在极限。以 EPC 话务模型为例, 以业界通常评估的平均一个流 20 个报文计算, 除去必须首包学习上送 CPU 的报文, 理论上剩下 19 个报文都可以被卸载, 此时加速比的极限为 20 倍, 这是这一话务模型下硬件加速的理想目标。

## 6 结束语

不匹配三角揭示的矛盾, 在 5G 核心网 U 面 UPF 上体现为网卡带宽需求远超过当前主流双路服务器的 CPU 计算能力。通过 FPGA 智能网卡实现报文卸载, 可有效降低 CPU 负荷实现再平衡, 由此降低了每吉比特流量的设备成本。同时, FPGA 智能网卡的灵活性也可保证加速硬件资源池的通用性。

## 参考文献

- [1] 童琳, 郑胜利. 高性能网关设备及服务实践 [EB/OL]. (2014-11-28)[2020-06-15]. <https://blog.csdn.net/yangdelong/article/details/80876784>
- [2] 岳青伦. NFV 硬件加速, 在困窘中前行 [EB/OL]. (2017-12-25)[2020-06-15]. <https://www.sd-nlab.com/20374.html>
- [3] ETSI. Network Functions Virtualisation (NFV); Acceleration technologies; Report on acceleration technologies & use cases: GS NFV-IFA 001[S]. 2015

## 作者简介



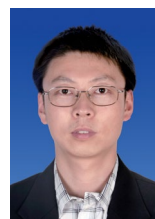
王升, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所项目经理; 研究方向为 NFV、虚拟化平台、异构硬件加速、泛在计算等。



班有容, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所项目经理; 研究方向为异构硬件加速, 泛在计算等。



陈佳媛, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所技术经理; 研究方向为网络功能虚拟化 NFV 等。



张昊, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所副所长; 长期从事移动通信领域相关工作, 研究方向为 EPC、5G、IMS、NFV、SDN 等。





# ENI 辅助的 5G 网络切片 智慧运营

## ENI Assisted Intelligent 5G Network Slicing Operation

王海宁 /WANG Haining

(英特尔(中国)有限公司, 北京 100013)  
(Intel China Ltd., Beijing 100013, China)

**摘要:** 利用网络人工智能标准工作组(ENI)系统辅助完成 5G 网络端到端切片的创建、监控、编排管理及终止等一系列生命周期管理操作, 实现基于人工智能的闭环自动化控制, 可以确保切片的快速开通、网络资源的高效利用和服务等级协议(SLA)保证。提出 ENI 系统辅助的端到端 5G 网络切片管理框架。

**关键词:** 网络切片; ENI; 人工智能; 资源分配; 场景; 概念验证

**Abstract:** Assisted by experiential networked intelligence (ENI) system, the lifecycle management operations including creation, monitoring, orchestration and management for end to end 5G network slice can be realized with artificial intelligence (AI) based close-loop control. This is essential for ensuring fast service onboarding, efficient network resource utilization, and service level agreement (SLA) for network slice. A framework for end to end 5G network slice management assisted by ENI system is proposed.

**Keywords:** network slice; ENI; AI; resource allocation; scenario; proof of concepts (PoC)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200624.1453.004.html>

网络出版日期: 2020-06-24

收稿日期: 2020-04-12

下一代移动通信网络运营商联盟(NGMN)在 2015 年初发布的 5G 白皮书<sup>[1]</sup>中引入了网络切片的概念。5G 网络切片通过组合特定的控制面和用户面 5G 网络功能来支持一类特定的通信连接业务。例如, 第 1 个 5G 网络切片用来支持智能手机宽带业务, 第 2 个 5G 网络切片用来支持自动驾驶业务, 第 3 个 5G 网络切片用来支持大规模物联网业务。这些逻辑独立的网络切片是端到端的, 包括接入网、承载网及云化核心网。切片内部可以按照业务需求来选择所需的 5G 网络功能进行组网, 切片间可以共享通用的物理

基础设施, 并保持良好的业务隔离。

以 5G 网络切片为代表的网络新技术, 一方面为 5G 网络带来了灵活的业务提供能力, 另一方面大大增加了网络运维的复杂性。传统的依赖专家经验和人机交互的被动式网络运维方式, 成本高昂并且容易出错, 将阻碍网络业务的快速创新和部署上线, 不足以支撑 5G 网络运营。上述问题触发了运营商将人工智能(AI)引入网络运维的思考和探索。ETSI 于 2017 年 2 月正式批准成立的网络人工智能标准工作组(ENI)<sup>[2]</sup>, 致力于通过引入闭环人工智能机制来改善网络运营体验。

ENI 目前已有近 60 家来自全球的成员和参与单位, 是 ETSI 最活跃的 4 大工作组之一。经过 3 年的研究工作, ENI 输出了用例、需求、术语、架构等系列规范, 并启动了 10 余个基于 ENI 架构和用例的概念验证项目。其中, 5G 网络切片智慧运营是 ENI 的一类重要应用场景, 也是 ENI 的重点概念验证方向。

### 1 ENI 系统功能架构

ENI 系统是一套基于“观察-调整-决策-行动”控制循环模型的功能集合, 它利用人工智能技术输出命

令、建议及知识，用于辅助或直接管理其他系统实现智慧运营<sup>[1]</sup>。ENI 系统功能架构如图 1 所示：

ENI 系统通过可选的应用程序编程接口（API）代理与业务支撑系统（BSS）/运营支撑系统（OSS）等外部系统交互，从外部获取数据，经过内部智能化分析，对外输出建议或命令。ENI 系统内部主要包括以下 3 类功能模块。

1) 输入处理类功能模块

(1) 数据摄取功能模块：从多个输入源收集数据，并使用通用的数据处理技术使摄取的数据能够被其他 ENI 功能模块进一步处理和分析。

(2) 数据规范化功能模块：将对数据摄取功能模块接收到的数据进行处理，并将其转换为其他 ENI 功能

块能够理解和使用的形式，以便进行进一步分析。

2) 分析类功能模块

(1) 知识管理功能模块：负责管理 ENI 系统的知识数据库，是 AI 建模的基础。知识管理包括使用共识性知识表示来创建、修改、维护和增强知识资产的存储、评估、使用、共享和完善。

(2) 上下文感知功能模块：持续地收集 ENI 系统自身及外部系统信息，构建 ENI 系统进行决策的基础环境。

(3) 认知管理功能模块：使用已有知识来生成和验证新知识。

(4) 态势感知功能模块：识别当前情况以及未来可能发生的情况，理解环境如何变化及为何变化，明确这些将如何影响 ENI 系统试图实现的

目标，决定对给定事件的处理操作。

(5) 模型驱动工程功能模块：使用模型驱动的工程机制将态势感知功能模块输出的操作转换成统一的格式，在此基础上可以进一步被策略管理功能模块构建为命令式、声明式及意愿式的策略。

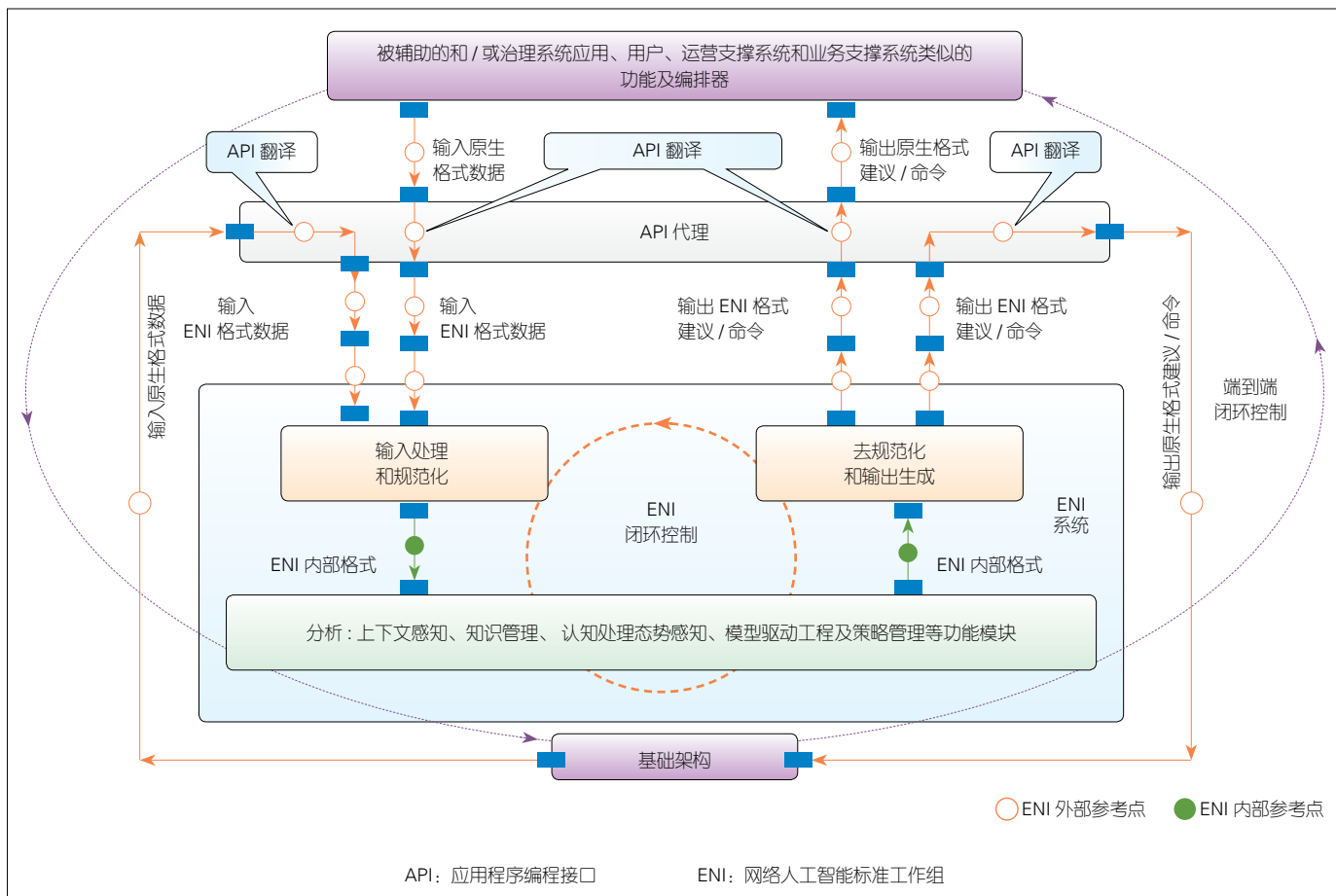
(6) 策略管理功能模块：制定对外部系统的管理、监控和编排等策略。

3) 输出生成类功能模块

去规范化和输出生成功能模块：将 ENI 系统内部格式的数据和信息翻译成外部系统能够理解的格式。

2 5G 网络切片智慧运营场景

ENI 001 规范<sup>[5]</sup>定义了 20 余种网络智慧运营的场景，其中涉及网络切片的有 7 个，覆盖了前传网络切片管



▲图 1 ENI 系统功能架构（顶层）<sup>[4]</sup>

理编排、承载网切片生命周期管理、接入网和核心网虚拟网元弹性伸缩及云间迁移、切片服务等级协议 (SLA) 保证等方面。

### 2.1 智能前传网络管理编排

目前全球广泛应用的集中式无线接入网 (C-RAN) 将基站的基带处理单元 (BBU) 部分集中部署, 与射频拉远单元 (RRU) 之间通过前传接口连接, 具体使用通用公共无线接口 (CPRI) 协议。CPRI 采用点对点连接模式, 需要高带宽、低延迟、严格同步和额外的传输设备。

5G 无线网络对 BBU 和 RRU 的功能进行了重新划分, 将部分 BBU 功能转移到 RRU 以减少对前传带宽的压力, 重构后分别称为无线云中心 (RCC) 和射频拉远系统 (RRS)。其中 RRS 又包括天线、RRU 以及传统 BBU 的部分基带处理功能即射频聚合单元 (RAU)。RCC 与 RAU 之间采用增强的 CPRI (eCPRI) 接口, 基于分组交换协议将前传由点对点的模式重新定义为多点对多点的模式。换句话说, 下一代前传网络是一个多层共享网络, 可以按需动态调整 RCC 和 RAU 之间的网络资源切片。

前传网络对资源的切片受多种因素及环境变化影响, 例如: RRU 群集的大小和如何组成群集, RCC 和 RAU 之间的功能划分, 以及前传网络需要保留网络资源的解决方案空间的维度 (比如功率、处理能力、无线资源、缓冲内存、跨多个前传节点的路径选择等)。在这种情况下, 引入基于 AI 的前传网络切片管理编排, 可以充分考虑并平衡上述影响网络切片的多维度因素, 以实现灵活、动态的资源切片和功能拆分。例如, 当前传关键性能指标低于目标值时, 将触发 ENI 系统从不同 RAU / RCC 单元收集前传参

数、当前配置以及过去和当前的流量, 基于历史学习得到的经验和当前上下文对未来需求进行预测, 决定前传参数并反馈给 RAU / RCC 单元执行调整, 重新分配前传网络资源, 新的前传 KPI 也会反馈给 ENI 系统, 这样就形成了前传网络切片的闭环智能化管理编排。

### 2.2 智能承载网切片生命周期管理

承载网切片是 5G 端到端切片的一部分, 通过对网络的拓扑资源进行虚拟化, 形成按需组织的网络切片以实现特定的性能要求<sup>[6]</sup>。承载网切片管理器 (TNSM) 和承载网节点设备之间采用软件定义网络技术, 实现 TNSM 对多个承载网节点设备的集中控制。承载网转发面的切片技术包括基于灵活以太网 (FlexE) 的硬切片技术和基于分段路由 (SR) 的软切片技术, 其中, 软硬切片技术可以结合使用。

为了避免流量高峰期资源紧缺, 承载网切片的资源一般以满足业务峰值的要求进行分配, 但是这也造成了大多数非高峰期时段网络带宽、服务质量等专属资源的冗余和浪费; 因此, 引入 AI 技术对业务未来的流量进行精准预测, 结合承载网上下文信息, 制定智能化承载网切片配置策略, 能够有助于实现承载网切片资源的按需动态扩展和缩减, 提升承载网资源的利用率。

### 2.3 切片内虚拟网络功能的弹性伸缩和云间迁移

核心网切片基于网络功能虚拟化 (NFV) 技术, 使 5G 的网络功能 (NF) 从传统的专有硬件设备转变为在运行在共享云资源池上的虚拟网络功能 (VNF)。通过网络切片管理器 (NSMF) 及 NFV 管理编排系统 (MANO), 可以按需编排核心网切片内所需的 NF,

并为每个 NF 分配所需的虚拟资源。NFV 技术提供了 VNF 弹性伸缩和迁移的功能, 例如为一个 VNF 实例增加或减少虚拟机数量, 或者直接增加或减少 VNF 实例的数量, 或者将 VNF 实例从一个资源池迁移到另外一个资源池, 以便更灵活地按照业务需求分配资源。

引入 AI 技术后, 对业务趋势和资源需求进行预测, 并根据核心网切片的上下文信息, 给出 NF 的资源分配建议策略。通过 NSMF 和 MANO 执行资源分配和业务迁移, 可以在实时业务过程中实现 VNF 动态弹性伸缩和云间迁移。

## 3 ENI 辅助的智能切片概念验证

为了验证 ENI 技术的有效性, 并在互操作等方面更好地引导 ENI 后续规范制定工作, ENI 在 2018 年启动了概念验证 (PoC) 项目<sup>[7]</sup>。目前 ENI 已有 10 项 PoC 项目, 最早完成的两个 PoC 项目很好地验证了 AI 技术可以辅助实现网络切片智慧运营。

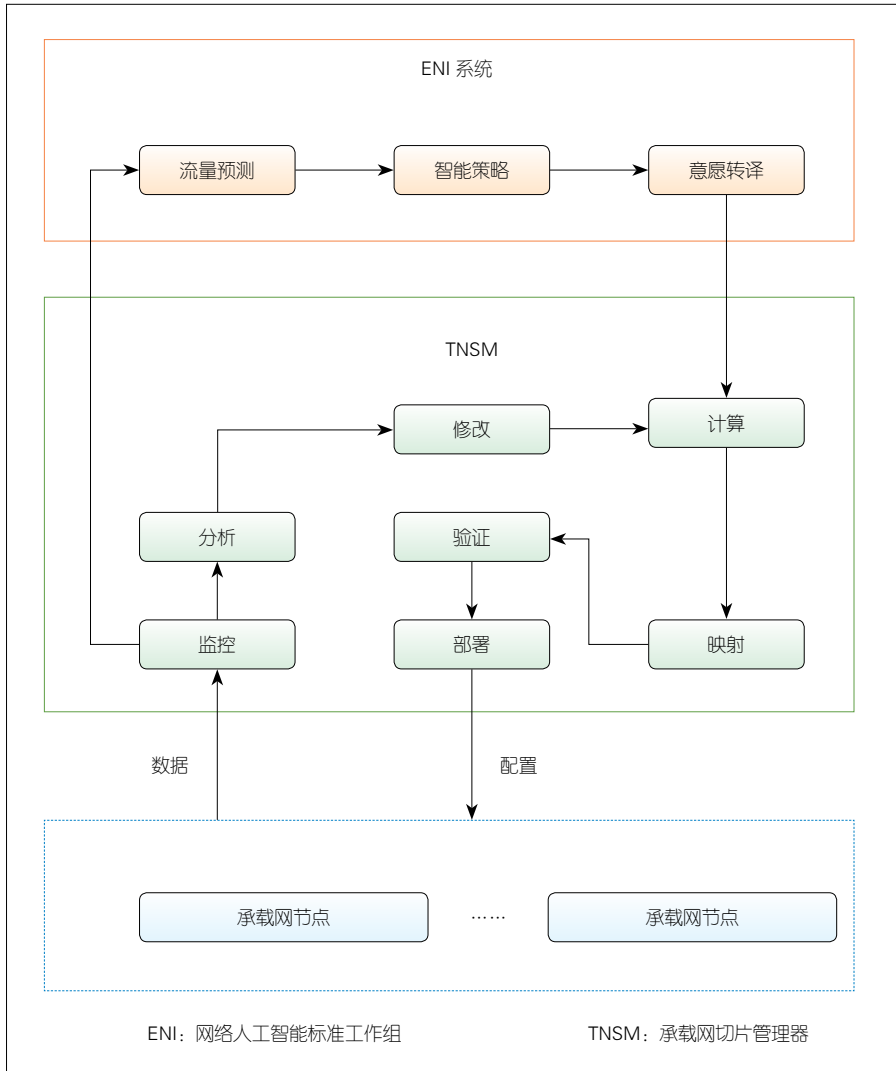
### 3.1 PoC#1 智能网络切片的生命周期管理<sup>[8]</sup>

该项目针对本文 2.2 节所述的场景进行了验证, 具体包括两个方面: 一是利用基于意愿的接口将用户业务意愿自动翻译为配置并创建切片; 二是利用 AI 技术预测网络流量变化趋势并对网络切片资源进行预调整。

项目采用的方案验证架构如图 2 所示。

验证方案及结果如下:

1) 基于业务意愿的承载网切片自动化创建。用户通过 TNSM 操作界面输入业务意愿, 例如业务类型、优先级、带宽和时延需求等, TNSM 将上述业务意愿自动转译为创建承载网切片所需的配置信息, 结合对承载网



▲图 2 ENI 系统辅助的智能承载网切片验证架构

实际情况的分析，计算得到最佳的切片配置信息，经过验证后下发到承载网节点执行，从而实现承载网切片的快速自动化创建。

2) 基于 AI 的流量预测及切片带宽智能化调整。使用 27 312 条按小时聚合的真实网络流量数据对基于长短期记忆 (LSTM) 网络叠加传统神经网络的 AI 流量预测模型进行训练。ENI 系统通过 TNSM 收集承载网切片实例的准实时流量数据和网络切片资源分配情况，并使用预训练的流量预测模型根据准实时流量数据预测未来 6 小时的流量趋势，并传递给智能策略生

成器。智能策略生成器根据接收到的预测结果判断承载网切片的带宽在下一个小时是否需要调整以及如何调整，并在需要调整时生成智能扩缩容策略，例如需要扩容两个单位的带宽，之后 ENI 系统将智能策略转译为配置建议下发至 TNSM。最后，TNSM 通过重新配置承载网节点的端口带宽来执行相应的智能扩缩容策略，从而实现承载网切片带宽根据未来流量变化趋势进行动态智能化调整。经实验验证，使用上述方法在真实网络流量测试数据集基础上，网络资源利用率可提高 30% 左右<sup>[9]</sup>。

### 3.2 PoC#2 弹性网络切片管理<sup>[10]</sup>

该项目是欧盟的 5G-MoNArch 项目<sup>[11]</sup>的一部分。针对本文 2.3 节所述的场景，该项目目标是验证 AI 辅助的网络切片弹性管理和编排的可行性和收益。

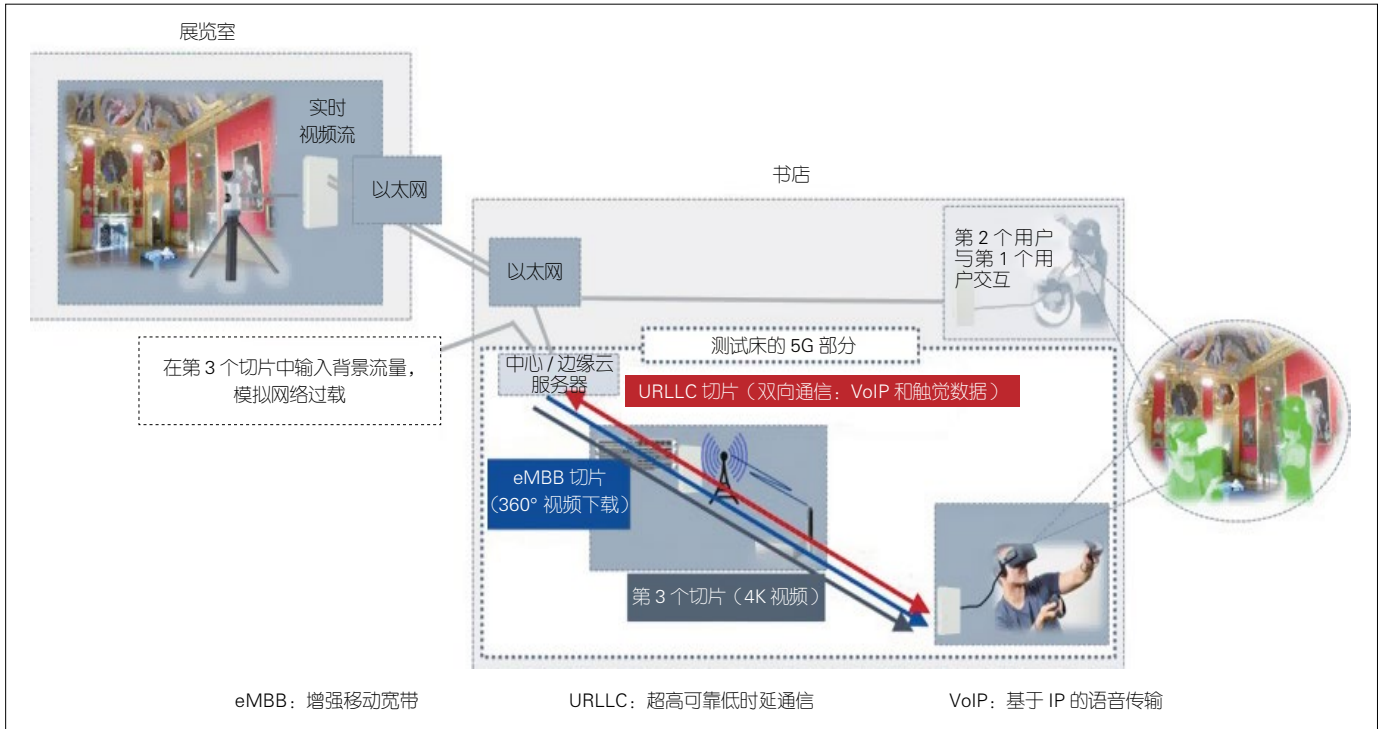
该项目在意大利都灵市的马达马宫艺术博物馆搭建了如图 3 所示的测试床，使用虚拟现实 (VR) 游览业务进行了现场验证和展示，验证方案及结果如下。

1) 系统包括边缘云和中心云两个资源池，首先通过 MANO 创建 3 个切片：第 1 个切片用于承载来自 VR 业务所需的展览室 360° 视频流，属于增强型移动宽带类 (eMBB) 切片；第 2 个切片用于处理 VR 业务的其他所有通信服务，例如基于 IP 的语音传输 (VoIP)、多用户交互及 3D 模型注册和控制等，属于超高可靠低时延通信 (URLLC) 切片；第 3 个切片用于加载 4K 视频流作为背景流量模拟资源占用，也是 eMBB 类切片。

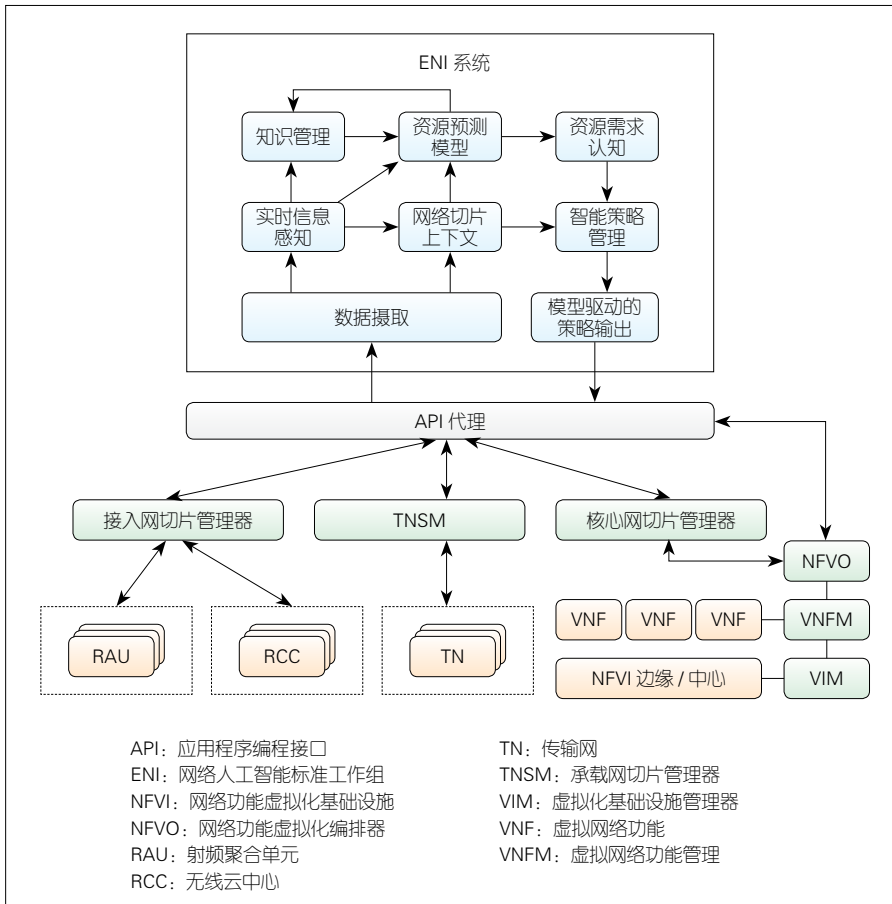
2) VR 业务两个切片的 NF 部署在边缘云。当背景流量增加，同时影响到 URLLC 切片的性能时，触发 ENI 的智能编排算法将制定 NF 编排策略，通过 MANO 将 eMBB 切片的 NF 迁移部署到中心云，以便保证 URLLC 切片的性能。

3) 当 eMBB 切片的视频分辨率和视频流的编码速率引起资源需求变化时，将触发 ENI 的跨切片资源分配算法制定资源重分配策略，通过 MANO 对 VNF 进行扩缩容。例如，将背景流量 eMBB 切片的部分资源调整给 VR 业务 eMBB 切片使用，从而保证最佳的业务体验。

上述测试验证了 ENI 系统可以根据业务需求对核心网切片进行 NF 部署位置和数量两个维度做出智能化调整，保证切片业务的 SLA。



▲图 3 网络人工智能标准工作组系统辅助的弹性网络切片管理测试床<sup>[2]</sup>



▲图 4 ENI 辅助的端到端网络切片管理框架

#### 4 ENI 系统辅助的端到端网络切片管理框架

ENI 系统通过可选的 API 代理与接入网、承载网、核心网各切片子网的切片管理器对接, 实现对整个端到端切片的智慧运营。ENI 辅助的端到端网络切片管理框架如图 4 所示。

1) ENI 系统利用历史数据训练基于 AI 的各网络域切片资源预测模型, 并利用最新的数据知识进行周期性迭代训练和模型优化。

2) ENI 系统通过各网络域的切片管理器收集网络切片的各类信息, 包括网络切片的资源分配情况和关键参数等, 构建端到端网络切片上下文。

3) 资源预测模型根据实时数据预测未来的资源需求趋势形成资源需求认知, 并传递给智能策略管理器。

4) 智能策略管理器结合接收到的资源需求预测和网络切片上下文, 制定网络切片资源分配策略。

5) ENI 系统将网络切片资源分配策略通过模型驱动工程方式, 转译为

各网络域切片配置建议, 例如前传网络切片的资源配置建议、承载网切片的带宽调整建议、核心网 VNF 的扩缩容建议等, 并下发给各网络域的切片管理器执行。

上述框架可以实现端到端网络切片的闭环智能化资源动态调整, 辅助 5G 网络切片智慧运营。

## 5 结束语

网络切片是 5G 网络的重要创新特性, 为 5G 网络提供了一个灵活的生态系统。该生态系统将端到端云网资源集成在一起, 面向多样化的 5G 业务需求, 提供软件化、虚拟化、可编程的网络创新能力和网络连接服务。引入基于 AI 的闭环自动化技术, 可以更好地发挥网络切片的优势, 提升网络资源利用率和业务体验, 实现网络切片的智慧运营。

### 参考文献

- [1] NGMN Alliance. 5G white paper, version 1.0[EB/OL]. (2015-02-17)[2020-06-16]. [https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN\\_5G\\_White\\_Paper\\_V1\\_0.pdf](https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf)
- [2] WANG Y, FORBES R, CAVIGIOLI C, et al. Network management and orchestration using artificial intelligence: overview of ETSI ENI[J]. IEEE communications standards magazine, 2018, 2(4):58-65. DOI: 10.1109/MCOM-STD.2018.1800033
- [3] ETSI. Experiential networked intelligence (ENI); Terminology for main concepts in ENI: ETSI GR ENI 004[S]. 2018
- [4] ETSI. Experiential networked intelligence (ENI); System architecture: ETSI. GS ENI 005[S]. 2018
- [5] ETSI. Experiential networked intelligence (ENI); ENI use cases: ETSI. GS ENI 001[S]. 2018
- [6] 王强, 陈捷, 廖国庆. 面向 5G 承载的网络切片架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.012
- [7] ETSI. Experiential networked intelligence (ENI); Proof of concepts framework: ETSI. GS ENI 006[S]. 2018
- [8] ETSI. Intelligent network slice lifecycle management[EB/OL]. [2020-06-16]. [https://eniwiki.etsi.org/index.php?title=PoC\\_01:\\_Intelligent\\_Network\\_Slice\\_Lifecycle\\_Management](https://eniwiki.etsi.org/index.php?title=PoC_01:_Intelligent_Network_Slice_Lifecycle_Management)
- [9] 王海宁, 袁祥枫, 杨明川. 基于 LSTM 与传统神经网络的网络流量预测及应用[J]. 移动通信, 2019, 43(8): 37-44
- [10] ETSI. Elastic network slice management[EB/

OL]. [2020-06-16]. [https://eniwiki.etsi.org/index.php?title=PoC\\_02:\\_Elastic\\_Network\\_Slice\\_Management](https://eniwiki.etsi.org/index.php?title=PoC_02:_Elastic_Network_Slice_Management)

- [11] 5G-MoNArch. 5G mobile network architecture, about the project[EB/OL]. [2020-06-16]. <https://5g-monarch.eu/about-the-project/>
- [12] 5G-MoNArch. Touristic city use case[EB/OL]. (2019-05)[2020-06-16]. <https://5g-monarch.eu/about-the-project/touristic-city-use-case/>

### 作者简介



**王海宁**, 英特尔(中国)有限公司人工智能技术政策和标准总监、中关村高端领军人才、正高级工程师、北京邮电大学兼职教授, 担任 ETSI ISG ENI 副主席、CCSA SP1 NFV 特设项目组副主席、CCSA TC610 网络人工智能应用工作组

组长等职务, 主要研究方向为 4G/5G 网络技术、SDN/NFV、网络人工智能等; 2017 年获北京市委组织部青年骨干个人项目资助; 主持编制数十项国际标准和行业标准, 拥有 20 余项授权专利, 发表文章多篇, 出版《5G 网络架构》并作为专著封面作者。



# 5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨

## IPv6 Deployment in 5G SA Network

马晨昊 /MA Chenhao<sup>1</sup>, 解冲锋 /XIE Chongfeng<sup>1</sup>, 郑伟 /ZHENG Wei<sup>2</sup>, 李聪 /LI Cong<sup>1</sup>

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209;  
2. 中国电信股份有限公司江苏分公司, 江苏 南京, 210037)  
(1. China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China;  
2. China Telecom Jiangsu Branch, Nanjing 210037, China)

**摘要:** 针对 5G 独立组网 (SA) 网络引入 IPv6, 分析了 5G SA 用户面引入 IPv6 单栈的可能方案; 特别提出了一种新型的基于 IPv6 单栈技术方案, 详细介绍了其中的总体结构、冗余备份、端口映射和溯源方式等。相比于传统的双栈技术, 新的技术方案不仅解决了终端地址不足问题, 还可以降低网络维护的成本, 符合网络的发展趋势。最后, 提出了运营级网络选择演进路线的策略建议。

**关键词:** 5G SA; IPv6 单栈; NAT64; 端口映射

**Abstract:** Focusing on the issue of deployment of IPv6 in 5G standalone (SA) network, different solutions of introducing IPv6 into 5G SA user plane are illustrated. In particular, a new IPv6-only solution is introduced, including its overall architecture, redundancy, port mapping and traceability solutions. Compared with the traditional dual-stack approach, the new one solves the problem of terminal addresses shortage, and helps to reduce the cost of network maintenance, which is in accordance with the trend of the network development. In the end, a strategy proposal for the carrier-grade network to choose the migration path is proposed.

**Keywords:** 5G SA; IPv6-only; NAT64; port mapping

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.0902.002.html>

网络出版日期: 2020-06-22

收稿日期: 2020-04-15

**作**为新一版互联网网络层协议, IPv6 在全球受到越来越多的重视。根据谷歌最新统计, 现在全球约有 30% 的用户开始使用 IPv6, 其中以欧美发达国家的 IPv6 发展最为领先。在 2016 年, IETF 就发表声明, 要求新的协议制定或协议扩展不要兼容 IPv4, 而要基于 IPv6。在中国, 自从 2017 年底中共中央办公厅和国务院

办公厅发布 IPv6 行动计划发布以来, 在运营商和 OTT (指互联网公司越过运营商) 等产业各界的协作下, 中国 IPv6 发展迅速, 分配了 IPv6 地址的用户数、IPv6 活跃用户数和流量增长迅速。与此同时, 作为新一代移动通信技术, 5G 也处于商用化部署的关键期。选择合适的网络协议和最佳功能配置是发展 5G 的关键。5G 和 IPv6 是构建中国新一代信息基础设施的两项重要技术支柱, 它们在新时期的相遇和融合, 是信息技术发展的必然。幸运的是,

在 3GPP 标准设计和设备实现上, 5G 已能良好地支持 IPv6 协议; 但是 5G 网络引入 IPv6 协议的技术路线, 在 3GPP 的相关标准中并没有详细和明确的说明。例如, 如何发挥 IPv6 的技术优势来提升网络的综合能力? 如何处理 IPv6 和 IPv4 的关系? 等。5G 网络引入 IPv6 涉及端、管、云等多个环节, 如果处理不好, 会对未来 5G 网络甚至互联网的发展产生不利影响。在 5G SA 部署过程中, 是延续传统继续部署双栈, 还是破旧立新, 直接采用 IPv6

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018YFB1800400)

单栈? 针对以上问题, 本文中, 我们在分析 5G 网络引入 IPv6 面临的挑战的基础上, 重点介绍和分析了不同的 IPv6 过渡方案, 特别论述了 5G SA 网络用户面引入 IPv6 单栈的新型技术方案, 并对其组网架构、冗余备份、端口映射和溯源方案做了详细介绍。在以上论述的基础上, 提出了运营商选择 IPv6 演进路线的策略建议。

## 1 5G 引入 IPv6 的主要问题及可选技术方案

5G 引入 IPv6 主要涉及 3 个层面: 用户面、控制面和承载面。用户面是与用户数据传输相关的层面, 它直接面向用户终端并直接为用户提供接入服务, 是 IP 地址消耗最大的层面; 控制面是指核心网设备之间的互连并且进行核心网协议交互的层面; 承载面是指城域网、骨干网等用于承载控制面和用户面的网络。每个层面都涉及到 IPv6 引入, 策略上也会有所不同。考虑到篇幅因素, 我们主要讨论用户面的 IPv6 引入问题。5G 引入 IPv6 时, 所使用的技术方案原则上不影响 5G 原有功能和性能, 并且尽可能发挥 IPv6 的技术优势来创建能力更高、成本更低的网络。当前 5G 引入 IPv6 的需要考虑如下几个因素:

1) 海量多业务承载。5G 需要承载的业务更加多样, 不仅支持传统的宽带上网业务, 还要支持物联网 (IoT)、移动边缘计算 (MEC)、车用无线通用技术 (V2X) 等新兴业务, 这主要对 IP 网络层提出 IP 地址数足够多、连接足够多、业务保持高稳定互通的要求。

2) 高性能保障。5G 网络性要求更为苛刻, 同时 4K/8K 高清视频、远程医疗、云游戏、远程驾驶、工业控制等增强移动宽带 (eMBB) / 超可靠低时延通信 (URLLC) 应用需求也日

趋紧迫, 它们对网络提出了超低时延、超大带宽的要求。而这些性能需求与网络用户面紧密相关, 需要用户面提供高效的数据处理和转发。

3) 安全可溯源。由于面向的场景更加多样, 5G 的连接数将会达到一个较高的数量级, 所传递的内容也将更为复杂。出于安全考虑, 用户面须提供完善的寻址方案和溯源方案, 以确保用户和终端的访问行为可追溯。

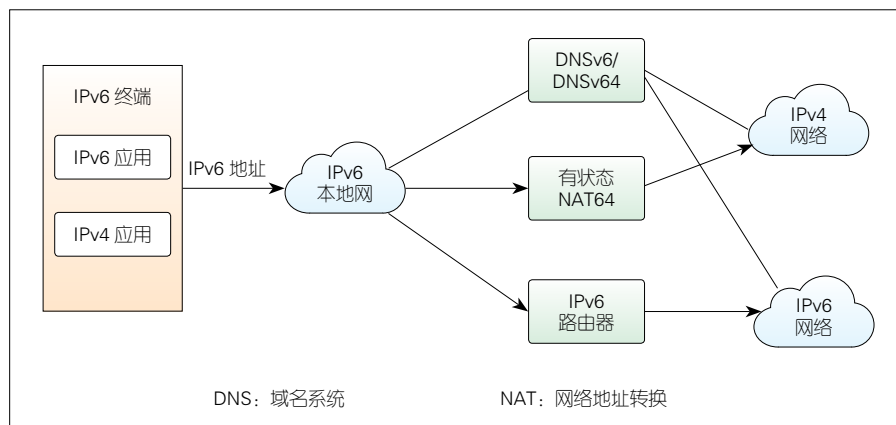
目前中国的 IPv6 部署主要采用双栈方式。网络给用户终端分配和维护 IPv4 地址和 IPv6 地址<sup>[1]</sup>, 支持 IPv6 业务和 IPv4 业务的访问, 两种协议逻辑上独立。由于当前 IPv4 地址极其稀缺, 因此移动网络通常给用户分配私有 IPv4 地址, 并在网络中部署支持网络地址转换 (NAT) 的设备进行公私有地址的转换。随着时间的推移, 双栈技术方案也日益暴露其缺点, 例如: 双栈并没有解决地址不足问题, 有些场景下用户的私有地址也发生冲突; 此外, 双协议栈的维护成本高等。

IPv6 单栈方案是以 IPv6 为基础协议建立的终端编址和业务承载体系。该方案构建在翻译技术的基础上, 在终端只有 IPv6 地址的情况下, 支持对 IPv6 和 IPv4 业务的访问。该方案的核心是 NAT64/DNS64 (DNS 指域名系统) 技术。NAT64<sup>[2]</sup> 是一种有状态的网络

地址与协议转换技术, 用于 IPv6 客户端和 IPv4 业务端传输控制协议 (TCP)、用户数据报协议 (UDP)、Internet 控制报文协议 (ICMP) 下的 IPv6 与 IPv4 网络地址和协议转换, 实现只拥有 IPv6 地址的终端发起连接访问 IPv4 侧网络资源。

在 IPv6 单栈网络中, 终端从网络侧只获得 IPv6 地址, 终端上存在支持 IPv6 的应用客户端, 也存在只支持 IPv4 的应用客户端。如图 1 所示, 当终端发起连接访问普通 IPv6 网站或其他服务器时, 流量将会匹配 IPv6 默认路由并直接转发至 IPv6 路由器处理, 正常访问 IPv6 网络中的资源。

当客户端去访问只支持 IPv4 协议栈的网站或服务时, 其目的 IPv4 地址需要由 DNS64<sup>[3]</sup> 服务器添加 IPv6 前缀 Pref64 来合成 IPv6 地址。其过程为: 终端向支持 DNS64 的 DNS 递归服务器发出 AAAA 类解析请求时, 如果权威服务器返回的记录为 RCODE=3 (名字错误, 表示请求中的域不存在), 说明该域名对应的服务器为 IPv4 单栈服务器。此时 DNS64 继续查询, 发出 A 类请求查询, 并获得 A 类查询结果。DNS64 支持将 DNS 查询信息中的 A 记录 (IPv4 地址) 合成到 AAAA 记录 (IPv6 地址) 中, 即为 IPv4 应用服务器的 IPv4 地址通过添加 IPv6 前缀 Pref64 映



▲图 1 IPv6 单栈方案示意图



射成了 IPv6 地址，并将生成的 AAAA 类结果返回给客户端。

在有些情况下，IPv4 网络侧的 IPv4 地址没有经过 DNS64 的处理直接到达 IPv6 单栈客户端里。此时，支持 RFC7050 协议<sup>[4]</sup>的 DNS64 服务器会把前缀 Pref64 下发至终端，终端可使用本地合成前缀的方式将目的 IPv4 地址合并成 IPv6 地址。

在获得 AAAA 类的解析结果后的该流量将被路由转发至 NAT64 路由器上，IPv6 与 IPv4 地址和协议在 NAT64 上进行合成转换，从而实现访问 IPv4 网络中的资源。需要补充说明的是，NAT64 设备中将 IPv4 地址合成 IPv6 地址采用的前缀 Pref64 与 DNS64 中采用的合成前缀 Pref64 是一致的。

## 2 5G SA 引入 IPv6 单栈的技术方案

### 2.1 5G 组网方案

结合 3GPP 的 5G 标准<sup>[5]</sup>和 IPv6 单栈的思路，我们建议的组网方案如图 2 所示。在 IPv6 单栈接入的环境下，终端只被分配了 IPv6 地址。为了

支持 IPv6 单栈终端访问支持 IPv4 协议的网站或者应用，在 5G 的用户面功能（UPF）位置部署支持 NAT64 设备，并在部署的 DNS 服务器升级支持 DNS64 和 RFC7050 协议，通过 IPv4 和 IPv6 翻译实现对于 IPv4 网站或者应用的访问。对于 NAT64 和 DNS64 的部署方式，NAT64 的部署可采取分布式、集中式或混合式。我们建议运营商根据实际需求选择具体部署方式。

在实际的部署中 NAT64 存在两种形态：插卡式 NAT64 设备和具备 NAT64 功能的专用设备。它们的部署方案也因此略有不同，具体介绍如下：

1) 插卡式 NAT64 设备。插卡式 NAT64 方案如图 3 所示，NAT64 板卡插于用户边缘路由器（CE）路由器上。正常状态下，板卡之间负载分担，若一块板卡发生故障，正常板卡承担全部业务。设备的冗余建议采用热备的方式备份，并且配置一致，同步 NAT64 会话信息，主备切换后用户无感知。在寻址和路由方面，我们建议不同的 CE 配置不同的 IPv4 地址池，配置相同的 IPv6 合成前缀 Pref64。在 IPv6 侧发布相同的 IPv6 合成前缀

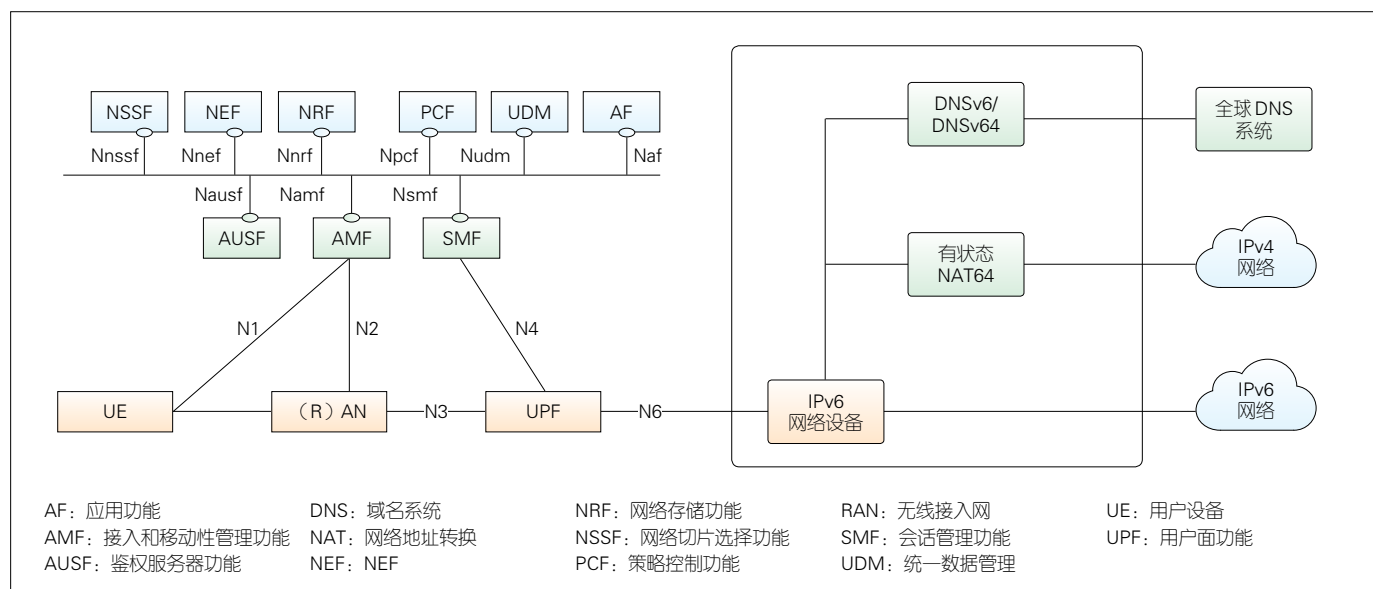
Pref64，在 IPv4 侧由于 IPv4 地址池不同，因此发布不同的 IPv4 路由。

2) 具备 NAT64 功能的专用设备。专用设备方案如图 4 所示，建议将设备侧挂于 CE 上路由器，设备之间通过接口互联。设备的冗余采用“1+1”的方式，正常状态下两台设备之间负载分担，若一台故障，另一台设备提供冗余。两台设备间通过热备方式备份，并且同步 NAT64 会话信息，主备切换后用户无感知。在寻址和路由方面和上述方案一样，主备设备配置不同的 IPv4 地址池和相同的 IPv6 合成前缀 Pref64，相互备份的两台 NAT64 设备在 IPv6 侧发布相同的 IPv6 合成前缀 Pref64，在 IPv4 侧发布不同的路由。

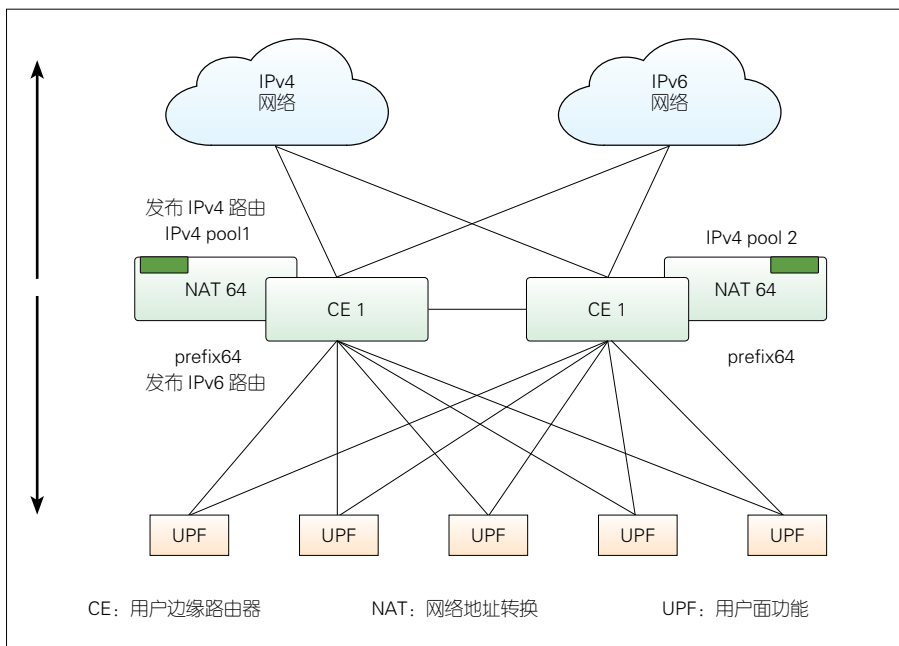
NAT64 功能除了用上述的专用硬件方式实现外，也可以采用虚拟化技术来实现。虚拟化 NAT64 的组网方案和物理设备的功能相同，和其他设备的互连接口也相同；不同之处仅在于 NAT64 功能在虚拟机上实现，考虑到篇幅，在此不做详述。

### 2.2 端口映射方案

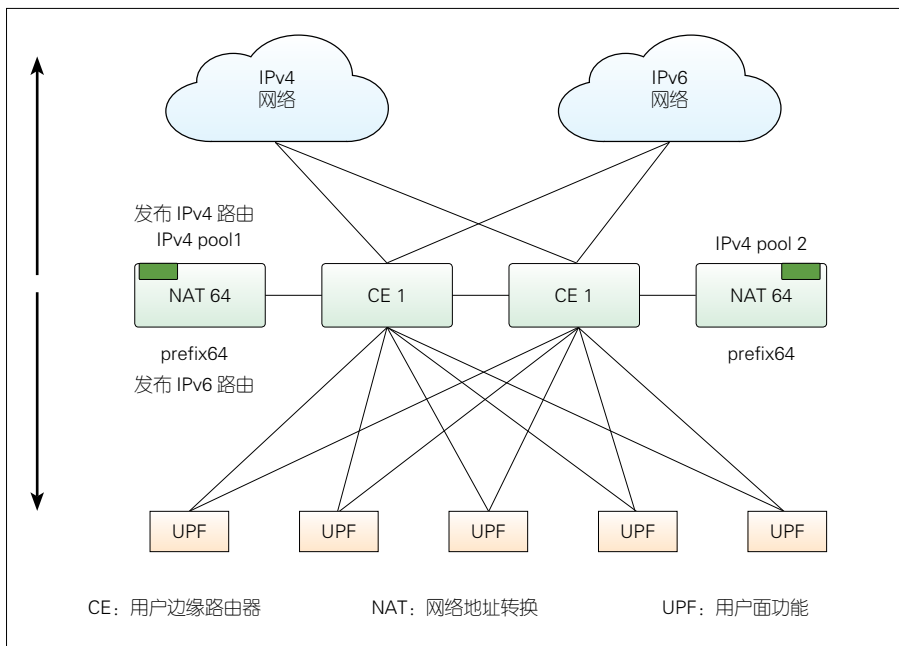
由于 IPv4 资源稀少，因此在



▲图 2 5G 独立组网网络架构图



▲图 3 插卡式 NAT64/ 运营级 NAT (CGN) 方案



▲图 4 专用的 NAT64 设备方案

NAT64 中用户的 IPv6 地址和 IPv4 地址并不是一一对应的。通常情况下，多个用户共享复用单个 IPv4 地址，此时需要进行地址变换和端口层面的映射，并动态建立映射会话。基于端口级建立映射会话，在溯源系统中需要存储大量的用户连接信息表。这会对

NAT64 设备、溯源系统以及设备间的交互接口都带来很大的压力。

为了减小溯源日志的数据量，我们建议使用用户动态分配“IPv4 地址 + 端口段”（简称“IPv4 端口段”）的方式，即采用用户 IPv6 地址和 IPv4 端口段进行动态映射的方式，将映射从端口级

提到端口段级。具体方式列举如下。

1) 当 IPv6 终端发起访问 IPv4 应用的请求时（数据上行）：

(1) 对于目的 IPv6 地址，在 NAT64 中做 IPv6 和 IPv4 协议和地址转换，此过程为无状态；

(2) 对于 IPv6 终端的源地址，在收到用户终端发出的首个数据包时，NAT64 为源 IPv6 地址从资源池中动态选取一个可用的 IPv4 端口段，将源 IPv6 地址变换为该 IPv4 端口段所在的 IPv4 地址，并将该 IPv6 数据包及后续使用该 IPv6 地址的数据包的源端口变换为该 IPv4 端口区间内的端口，利用该端口段在 NAT64 中建立和维护 TCP 和 UDP 的会话映射，在使用完毕后释放该 IPv4 端口段。

2) 当数据流返回时（数据下行）：

(1) 对于目的 IPv4 地址，根据 NAT64 设备中的映射会话将目的地址从 IPv4 转换成 IPv6 地址，同时进行端口和协议的转换；

(2) 对于源 IPv4 地址，在 NAT64 中添加 NAT64 的映射前缀 Pref64，做 IPv4 到 IPv6 地址和协议的转换。

此外，为了支持从 IPv4 访问 IPv6 的需求，我们建议 NAT64 需要同时支持通过手工配置静态映射关系，实现 IPv4 网络主动发起连接访问 IPv6 网络。

### 2.3 漫游考虑

IPv6 单栈对 5G 网络漫游的影响可以从两个场景来分析：运营商内的省间漫游和出国漫游。对于第一种场景，运营商在各省的网络均具为 IPv6 单栈配置，因此漫游用户在不改动终端配置的情况下可以使用 IPv6 单栈省份的环境，此时对于本地路由、回归属路由都没有特别要求；对于第二种情况，如果被访地的运营商网络不是

IPv6 单栈，此时终端可自动开启双栈模式，这样可以使非 IPv6 单栈的网络环境访问互联网。

## 2.4 溯源方案

在 5G IPv6 单栈环境中，由于 NAT64 目前采用的是有状态转换方式，在设备的运行过程中，NAT64 设备需要实时保持 IPv6 地址和端口与 IPv4 地址和端口段间的映射关系。为了支持访问溯源，我们建议将 NAT64 中映射表同步至日志服务器。

溯源方案如图 5 所示，在 5G IPv6 单栈网络中建立地址转换日志系统，其中包括 SYSLOG 日志服务器、数据采集设备、溯源查询服务器。多个服务器协同实现整个用户溯源的流程，数据采集设备采集用户和访问日志信息，NAT64 设备上传用户地址转换记录，两个信息相关联形成可供溯源功能的日志。NAT64 地址转换日志系统根据需求对现有系统进行相应扩展，完成用户地址映射信息的 SYSLOG 方式采集。此外，地址转换系统应能够满足用户级的地址映射信息采集的功能和性能要求。

溯源系统的查询过程就是通过给定的公网地址 + 端口号、映射关系建立的时间戳等信息来查询用户的源 IPv6 地址。这个源 IPv6 地址在 IPv6 单栈网络中是用户终端的公网 IPv6 地址。

## 3 IPv6 单栈的产业发展现状

IPv6 单栈是网络发展的国际趋势。微软、谷歌、苹果和思科等支持 IPv6 单栈的发展，特别是谷歌和苹果等在其 iOS 和 Android 终端产品中很早就实现了 IPv6 单栈的支持，即在给终端分配 IPv6 单栈地址的情况下，也可完成原有双栈的功能。在运营商方面，T-mobile、Sprint、Reliance Jio、

Orange、SK、Telstra 和 Rogers 等在 4G 时期就已经部署或者试验了 IPv6 单栈技术；但在中国，对于 IPv6 单栈技术的规模验证仍然缺乏，因此需要加强规模部署的研究和现网实验。

## 4 运营商 5G 网络引入 IPv6 的路线选择

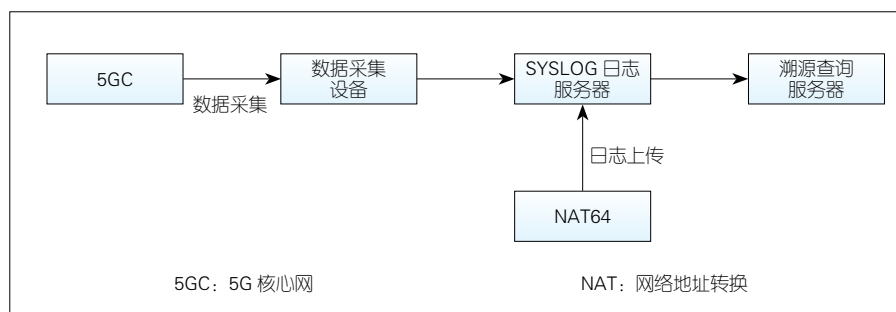
IPv6 单栈方案也可以解决网络中 IP 地址不足带来的编址问题。在传统网络中，不仅公有 IPv4 地址被耗尽，而且私有 IPv4 地址也紧缺，甚至会发生私有地址复用的现象。新兴业务如 IoT、V2X 和 MEC 等，对于编址提出了更高的要求，需要采用 IPv6 来解决编址问题。从双栈演进为 IPv6 单栈方案，在运维方面简化了网络管理，减少了访问控制列表（ACL）、路由配

置和管理工作量。在安全方面，单栈替代双栈，减少协议暴露面，降低了安全风险。终端采用唯一的公有 IPv6 地址也增强了溯源能力。

在当前激烈的市场竞争中，运营商注重业务的互通性和用户的体验。在设备能力具备及部署合理的前提下，IPv6 单栈技术方案可满足运营商这方面的要求。我们建议运营商根据自己的 IPv4 地址富余量、产业情况、政府政策及终端支持等因素综合考虑来选择路线。下面对 IPv6 单栈技术与 IPv4/IPv6 双栈技术的分析对比，具体如表 1 所示。

## 5 结束语

移动网络只给终端分配 IPv6 地址。在单 IPv6 地址的情况下，移动终



▲图 5 日志溯源系统组成示意图

▼表 1 双栈方案和 IPv6 单栈方案的对比

	IPv6 单栈方案	IPv4/IPv6 双栈方案
给用户终端分配 IP 地址类型	给用户终端只分配 IPv6 地址	给用户终端分配（私网）IPv4 地址和 IPv6 地址
支持的业务类型	IPv4、IPv6、双栈业务	IPv4、IPv6、双栈业务
网络侧 NAT 转化方式	6-4 转换	4-4 转换
安全性	单协议栈，暴露面少，安全性较高	双协议栈，暴露面高，安全风险相对较高
维护成本	单协议栈配置工作量较少，维护成本较低	双栈网络每个设备都要配置双协议栈，配置工作量较大，维护成本较高
转化设备成熟度	NAT64 在中国应用较少，但其他国家有多项规模应用案例	NAT44 成熟，在中国应用较多
转化设备成本	NAT64 的成本和 NAT44 基本相同	NAT44 的成本和 NAT64 基本相同
终端成熟度	成熟，苹果 iOS 和安卓均支持 IPv6 单栈	成熟
对于 DNS 服务器要求	支持 DNS64	/
Gi 口是否需要 IPv4 地址池	需要	需要

DNS: 域名系统

iOS: 苹果的移动操作系统

NAT: 网络地址转换

端不但能支持 IPv6 单栈业务，也能支持对 IPv4/IPv6 双栈及 IPv4 单栈业务的访问，使用户体验不会因为缺少 IPv4 地址而发生变化。需要说明的是，IPv6 单栈技术本身不提倡广泛使用 NAT64，而是希望实现 NAT64 转化的流量在总流量中的占比越来越少，而端到端的 IPv6 流量占比越来越大，因此使 OTT 的业务向 IPv6 进一步迁移。本文中，我们对 5G 引入 IPv6 的思路进行了探讨，介绍了 IPv6 单栈下 5G 的基本技术、组网方案、映射和溯源方案，为 5G 运营商的 IP 网络演进技术路线的选择提供参考。5G IPv6 单栈化将是网络向 IPv6 演进的重要一步，除了技术的因素外，OTT 企业和运营商各方的协同合作也是最终关键的关键。

**致谢**

本研究的实验工作得到了国家下一代互联网工程中心李震博士的协助，在此谨致谢意！

**参考文献**

- [1] ETSI. General packet radio service (GPRS) enhancements for evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 10.3.0 Release 10): TS 123 401 V10.3.0 LTE[S]. 2011
- [2] BAGNULO M, MATTHEWS P, VAN BEIJNUM I. Stateful NAT64: network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers: IETF RFC6146[S]. 2011
- [3] BAGNULO M, SULLIVAN A, MATTHEWS P, et al. DNS64: DNS extensions for network address translation from IPv6 clients to IPv4 servers: IETF RFC6147[S]. 2011
- [4] SAVOLAINEN T, KORHONEN J, WING D. Discovery of the IPv6 prefix used for IPv6 address synthesis: IETF RFC7050[S]. 2013
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501[S]. 2018

**作者简介**



马晨昊，中国电信股份有限公司研究院新兴信息技术研究所工程师；主要研究方向为 IPv6/SRv6、未来网络技术等。



解冲锋，中国电信股份有限公司研究院教授级高级工程师；主要研究方向为网络架构及演进、下一代互联网/IPv6、SDN/NFV、网络移动性、物联网及互联网安全等；发表论文 15 篇。



郑伟，中国电信股份有限公司江苏分公司工程师；主要研究方向为 5G 核心网、物联网、IPv6 等。



李聪，中国电信股份有限公司研究院新兴信息技术研究所工程师；主要研究方向为未来网络架构、新型网络技术等。



# 5G 核心网创新技术 研究及应用探索

## Research and Application of 5G Core Network Innovation Technologies

陆光辉 /LU Guanghui, 毛磊 /MAO Lei, 冯建业 /FENG Jianye

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

**摘要:** 研究了5G核心网的创新技术,包括多维网络切片、用户面软硬件加速、移动边缘计算(MEC)与5G结合、运维自动化和行业多样化使能技术,并探讨其在行业领域的应用和带来的价值。通过这些创新技术的使用,提出敏捷、算力、智能三位一体的5G核心网概念,以适应万物互联市场拓展的需要。

**关键词:** 5G核心网; 分布式集中分离; 移动边缘计算; 切片; 时间敏感型网络; 5G LAN; 非公共网络

**Abstract:** The 5G core network innovation technologies, including multi-dimensional network slicing, user plane hardware and software acceleration, mobile edge computing (MEC) and 5G integration, operation and maintenance automation, and industry diversification enabling technologies are studied in this paper. The applications and value of these technologies in industry field are then discussed. By the use of these innovative technologies, a 5G core network integrating agility, computing power and intelligence is created to meet the needs of the Internet of Things (IoT) market expansion.

**Keywords:** 5G core network; distribution unit separation; MEC; network slicing; time sensitive network; 5G local area network; non-public network

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003010  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200623.1540.004.html>

网络出版日期: 2020-06-24  
收稿日期: 2020-04-10

### 1 5G 核心网挑战分析

面对万物互联,5G网络需要更聪明、更灵活的大脑,来精准地感知网络数据流量上传下发的拥塞状态、业务动向、用户位置等信息。5G网络还需要具备用户和业务的接入控制、无线网络资源调度的能力。3GPP定义了全新服务化架构(SBA),采用HTTP/2互联网化的协议,借助IT云原生技术重构5G核心网。面对架构的全面革新,以及使能垂直行业的使命,如何协同标准、业界发展情况,稳、快、好、省地实现5G网络的商用落地,是

5G规模商用的挑战。目前的5G核心网存在以下的挑战:

1) 网络定制化能力低。过去通信网是面向确定性需求建设的,而随着通信网由消费互联网向产业互联网的发展,出现了越来越多的不确定性因素,传统的网络难以满足客户日益个性化的需求。此外,互联网应用创新要求网络更敏捷,行业需求的不确定性、差异化网络服务协议(SLA)、面向大众市场用户(ToC)/面向垂直行业(ToB)业务的显著差异,则要求5G核心网更加敏捷,能够做到快速定制网络。面对数字化的浪潮,传统预先设定好的网络

难以适应,同时网络能力优势也未能针对云进行有效、统一地开放,这都导致网络侧成为创新的瓶颈。

2) 虚拟化性能难以媲美专有硬件。网络功能虚拟化(NFV)软硬件解耦、通用硬件的采用,以及NFV在电信领域的逐步普及,虽然降低了硬件成本,提升了资源利用率,但因为引入中间的虚拟化一层导致网络转发性能有所下降。除了在虚拟化层面使用CPU绑定、单根输出输出虚拟化(SR-IOV)、多网卡绑定等技术手段来减少虚拟化和x86硬件引入带来的性能损耗,还需要在软件和硬件层面

做相应的增强,使得 5G 用户面能够兼顾强转发和强计算的能力。

3) 中心式网络难以应对流量指数级增长。随着移动互联网的发展,用户对流量的需求与日俱增。4G 不限流量套餐的推出,使得网络只能不断地升级扩容,这种以中心式建网弊端日益凸显。提速降费的大背景,对运营商的流量经营带来了压力。另外,随着 5G 大带宽、低时延业务的发展,云虚拟现实(VR)/增强现实(AR)、大视频等 5G 新业务将对中心网络造成进一步冲击,大量的业务要求能够在本地消化和终结,以降低网络时延以及骨干网络负荷。

4) 网络缺乏自动化开通和运维的能力。虚拟化后的软硬件解耦程度增大,使得组网更加复杂。网络结构正向多厂商、多平台、多组件、多接口演进,运营商在 5G 核心网建设时将面临多厂商、跨域集成等多项挑战,基于人工的方式难以迅速响应随需而动的网络维护。5G 网络比 2G/3G/4G 复杂得多,高度弹性,动态变化,急需引入人工智能(AI)、大数据等新技术,以推动网络运维的自动化、智能化发展。

## 2 5G 核心网创新技术

与 LTE 相比,5G 的主要目标不仅仅是为了带来更高速率的数据服务。为此,ITU-R 定义了增强移动宽带(eMBB)、超可靠低时延(URLLC)以及海量机器类通信(mMTC)3 大场景<sup>[1]</sup>,使能垂直行业。3GPP 定义了 SBA 和功能模块化,实现业务的按需部署,新业务上线时间的缩短;定义的控制面和用户面分离(CUPS)技术,实现了用户面可以基于业务需求灵活部署;定义的移动边缘计算(MEC)技术,使得用户可以就近访问业务;定义的网络切片技术,可以使一套物

理网络服务于多个不同的应用场景。5G 核心网正是基于以上多种创新技术进行设计,完全满足 5G 时代业务多样化的需求,为网络走向开放和构建生态提供动力源泉。

### 2.1 跨域多维切片技术

切片是 5G 独立组网(SA)较为关键的因素,通过动态切片的自动化创建,以实现全网资源的调度,快速定制、兑现差异化的 SLA,满足各种垂直行业差异化的网络需求。网络切片是一种按需组网的方式,可以让运营商在同一基础设施上分离出多个虚拟的端到端网络。一个网络切片实例提供一个或多个业务场景。一个切片由一个或多个子切片组成,子切片包含无线、核心网、承载。两个切片可以共享一个或多个子切片。

4G 可以通过专用核心网(DCN)技术<sup>[2]</sup>实现类似切片的概念,但 4G DCN 技术仅是核心网单切片,不支持端到端,不具备管理灵活性,无法演进到 5G 切片。表 1 是 4G DCN 和 5G 切片技术比较。

▼表 1 4G DCN 和 5G 切片技术比较

关键技术点	4G DCN	5G 切片
切片范围	仅包括核心网	包括无线、传输、核心网
应用场景	<ul style="list-style-type: none"> <li>一个 UE 只能签约一个切片,如 NB-IoT</li> <li>一个 UE 只能同时接入一个切片</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>一个 UE 基于 Subscribed NSSAI 可以签约多个切片类型,如 eMBB、mMTC、URLLC</li> <li>一个 UE 可以同时接入多个切片(至多 8 个)</li> </ul>
切片选择	<ul style="list-style-type: none"> <li>只能根据签约选择切片</li> <li>UE 不能根据 APP 选择不同的切片</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通过 NSSF,可以基于 NSSAI、位置、负荷灵活选择不同切片</li> <li>支持 PCF 配置不同 APP,选择不同切片的策略,并下发给 UE</li> </ul>
切片管理	通过 NFVO+VNFM 用网络服务方式进行部署	<ul style="list-style-type: none"> <li>引入 CSMF、NSMF 和 NSSMF,支持切片的订购、端到端编排</li> <li>使用 NST 和子切片模板(NSST 描述切片和子切片的信息模型)</li> </ul>

CSMF: 通信服务管理功能  
DCN: 专有核心网  
E2E: 端到端  
eMBB: 增强移动宽带  
mMTC: 海量机器类通信  
NB-IoT: 窄带 - 物联网

NFVO: 网络功能虚拟化编排  
NSMF: 切片管理功能  
NSSAI: 网络切片选择辅助标识  
NSSF: 网络切片选择功能  
NSSMF: 子切片管理功能  
NSST: 网络子切片模板

NST: 网络切片模板  
PCF: 策略控制功能  
UE: 用户设备  
URLLC: 超可靠低时延通信  
VNFM: 虚拟化网络功能管理

面对不同的行业网络质量要求,需要为特定的行业应用或企业定义特定的切片,部署不同的切片实例,实现专属的网络。网络切片由网络功能构建而成,涉及到端到端网络。如果所有网络切片都采用完全独立的网络功能,会造成网络资源开销大和性价比低;因此,面对垂直行业时,网络功能在切片间需要根据实际情况进行共享,以满足资源效率提升的需求。目前,业界针对网络切片部署模式主要有 3 种,具体如图 1 所示。

1) 模式 1: 该模式的安全隔离要求高,成本敏感度低,如远程医疗、工业自动化等,不同切片采用完全独立的网络功能(NF),控制面和用户 NF 都不共享。

2) 模式 2: 该模式的安全隔离要求相对低,终端要求同时接入多个切片,如辅助驾驶、车载娱乐等,不同切片的部分控制面 NF 共享,用户面 NF 不共享。

3) 模式 3: 该模式的安全隔离要求低,成本敏感,如视频监控、手机视频、环境监测等,不同切片的所有

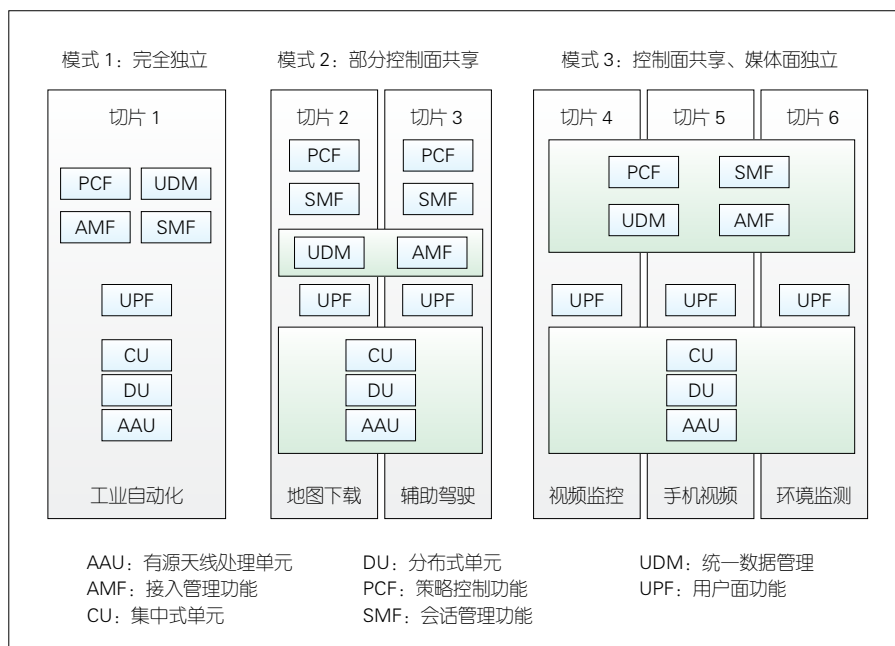
控制面 NF 共享，用户面 NF 不共享。

## 2.2 软硬件加速技术

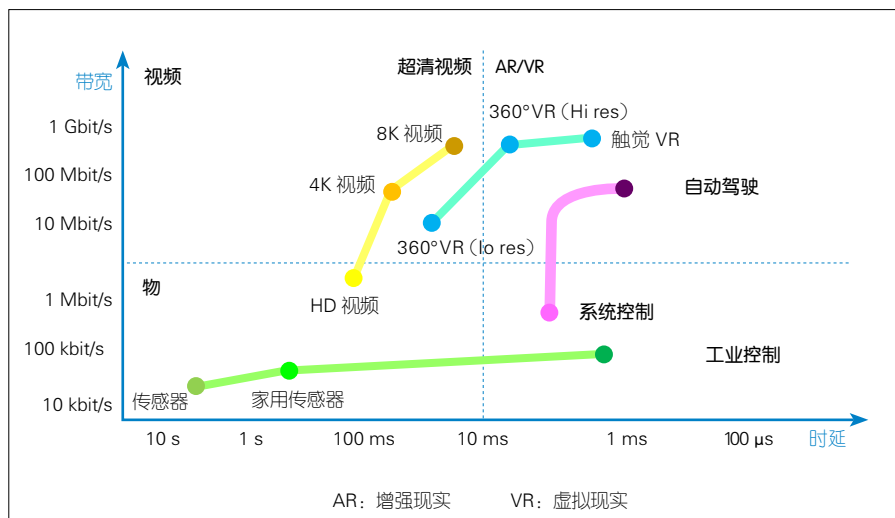
VR/AR、自动驾驶、云游戏等新兴业务对网络提出超低时延、超大带宽的要求，具体见图 2。这些性能需求与网络用户面紧密相关，需要用户面提供高效、快速的数据处理和转发。

在 eMBB 的场景下，可以通过纯软件加速的方案，并基于矢量包处理 (VPP)<sup>[3]</sup> 的思想，在数据报文卸载功能中采用矢量转发技术，提高转发处理性能，实现热点报文的批量处理和转发，有效地降低业务逻辑对 CPU 的消耗，并解决传统来包逐个处理、不加分类而产生的缓存抖动和缓存未命中的缺陷。采用数据平面开发套件 (DPDK)<sup>[4]</sup> 无锁化并行计算架构 (具体如图 3 所示)，能够将相同用户 IP 的报文放到同一个线程中，避免了多个线程同时读写同一个内存数据区的情况，实现了无锁化，并消除锁等待时间，从而达到高并发的效果。合理规划 DPDK 内存与缓存，需要将频繁执行的代码常驻指令 Cache，限制访存范围降低切页带来的消耗，大幅提升报文的处理速度。

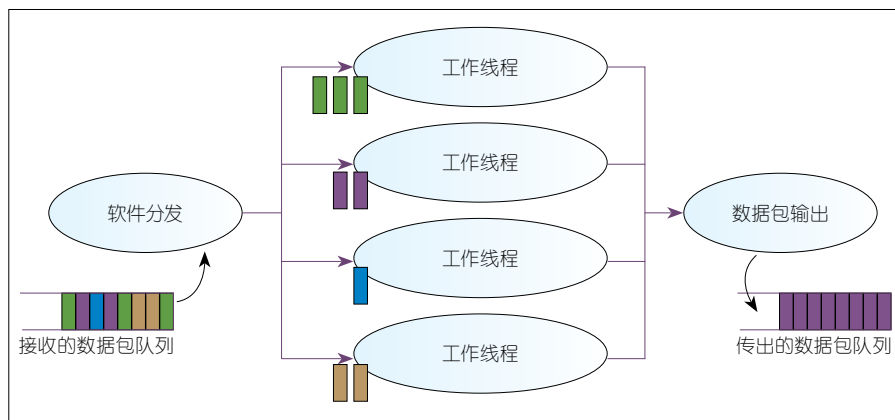
在 IMT-2020 的关键特性中，URLLC 要求端到端的时延为 1 ms，并尽可能减少非空口的传输时延，核心网侧用户面转发时延从 100 ~ 200 μs 降低至 10 μs。虽然在架构层面上，控制面和用户面分离技术 (CUPS) 实现了用户面下沉，但是基于纯软件加速已无法满足低时延的要求，需要借助硬件加速技术。目前，主流的加速卡硬件主要有现场可编程门阵列 (FPGA)、网络处理器 (NP) 和专用集成电路 (ASIC)。FPGA 因其更优的通用性和灵活性，又便于引入新特性，更加适合作为面向 5G 的虚拟化通用硬件加速平台。基于 x86 服务器的



▲图 1 网络切片部署模式



▲图 2 各种业务对网络的要求



▲图 3 数据平面开发套件无锁化并行计算

FPGA 智能网卡加速虚拟化用户面，性能媲美专用硬件。通过在软件 VNF 层面进行业务首包学习，生成转发流表，并将流表下发到智能网卡中，同一条流的后续数据报文将由智能网卡接收、解包、处理后直接转发，降低了节点内转发处理层次，大幅减少 CPU 计算、内存读取、外设部件互联标准 (PCIe) 总线的瓶颈，提升单服务器性能密度。

相对纯软件加速的用户面而言，智能网卡加速的用户面可以突破当前虚拟化转发的性能和时延瓶颈，实现虚拟化超高性能超低时延，显著降低转发时延达到微秒级别，满足 5G 工业控制、自动驾驶等超低时延应用。

### 2.3 行业使能技术

5G 在赋能垂直行业方面，除了提供基础的 5G 网络功能和业务支持外，为满足行业多样化的特性需求，3GPP R16 引入 5G 行业使能技术，包括时间敏感网络 (TSN)、5G 局域网 (5G LAN) 和 5G 专网 (5G NPN)<sup>[5]</sup> 等内容。通过这些行业增值产品包来满足场景化部署，从而推动智能制造与工业互联网 (IIoT)，引领工业 4.0。

TSN 引入 IEEE 的 TSN 特性，在以太网上提供确定性时间传输，实现了数据包在确定的时间内到达并转发。TSN 源于音视频领域的应用需求，最初称之为以太网音视频桥接技术 (AVB)<sup>[6]</sup>，用于传输高质量音视频；2012 年 IEEE 决定扩展工业控制领域，将其更名为 TSN。5G 系统作为 TSN 网桥与外部 TSN 网络集成，并通过设备侧 TSN 转换器 (DS-TT) 和网络侧 TSN 转换器 (NW-TT) 提供 TSN 入口和出口，实现 TSN 和 5G 网络的通信，使能实时物联网业务。5G+TSN 构建确定性网络 (如图 4 所示)，使得设备时间精准同步，并使能多节点高精度协作控制，支持低时延、低抖动、高可靠确定性

组网。将工业设备通过无线的方式接入到 TSN 网络，代替传统有线的方式，能够摆脱线缆束缚。典型的应用场景包括机器人协同、车辆精准调度、配电网差动保护等。

5G 专网 (NPN) 重点面向行业专有业务的接入，禁止非 NPN 用户接入 NPN 小区或跟踪区，打造安全、可靠、定制化 5G 专网。非公共网络架构如图 5 所示。5G 核心网部署到专有网络中，终端可以通过如下方式实现专网和公网的互访：

1) 用户通过专网接入时，专网同时作为信任或非信任 3GPP 接入，接入到公网，实现用户通过专网接入公网的互访需求；

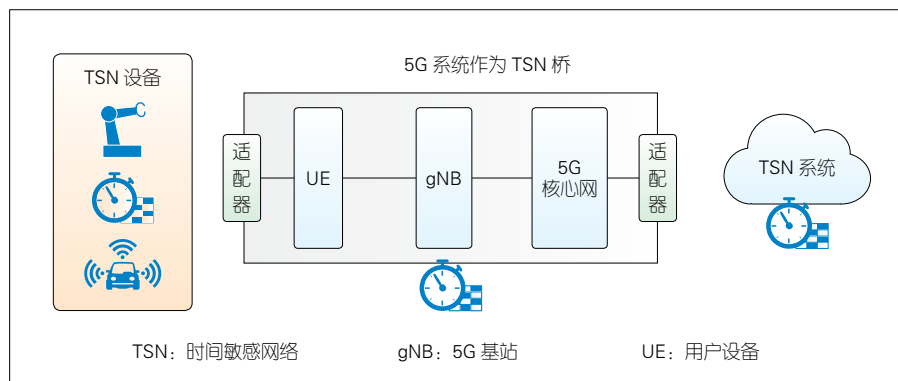
2) 用户通过公网接入时，公网同时作为信任或非信任 3GPP 接入，接入到专网中，实现用户通过公网接入专网的互访需求。

NPN 可以低成本、快速地部署局

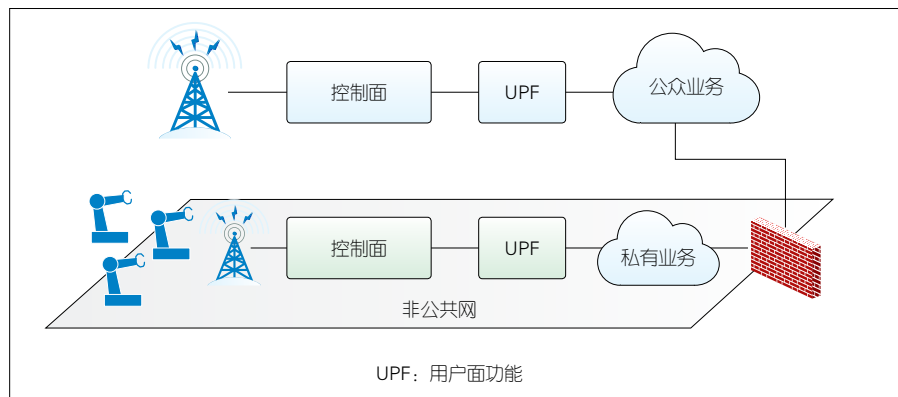
域工业互联网。NPN 易定制的特点满足了行业特定需求，提升用户体验。此外，NPN 有着保密性高、独立管控、小区级安全、敏感数据仅本地保存的特点。NPN 典型的应用场景包括工业园区、矿山、集装箱港口等。

5G LAN 支持局域网类型的网络覆盖，通过 UPF 完成 LAN 区域内的点对点通信，满足快速部署安全、可控的企业局域网的需求。通过会话管理功能 (SMF) 配置 UPF 来灵活处理单个 5G 虚拟网络组的协议数据单元 (PDU) 会话之间路由流量。例如，取决于目的地地址，一些分组流可以在本地转发，而其他分组流通过 N19 转发。5G 虚拟网络组通信有 3 种类型的流量转发方式：

1) 基于 N6 的转发，5G 虚拟网络组通信的上行 / 下行 (UL/DL) 流量被转发到数据网络 (DN)，或从 DN 转发；



▲图 4 5G+ 时间敏感网络



▲图 5 非公共网络架构



2) 基于 N19 的转发, 5G 虚拟网络组通信的 UL/DL 流量通过 N19 在不同 PDU 会话的锚点 UPF 之间转发;

3) 本地交换, 如果该 UPF 是同一 5G 虚拟网络组的不同 PDU 会话的通用 PSA UPF, 则流量由单个 UPF 在本地转发。

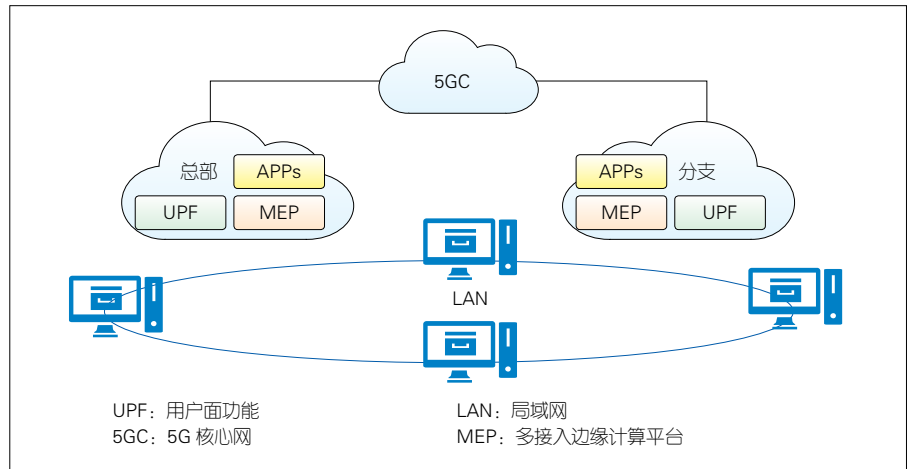
5G LAN 技术参见图 6, 其支持 UE 间的本地通信, 用户组灵活划分, 数据安全隔离, 并能优化数据路由与交换, 满足企业网快速部署, 自主实现群组管理和 IP 地址分配。典型的应用场景包括大型会议、赛事等。

### 2.4 边缘计算技术

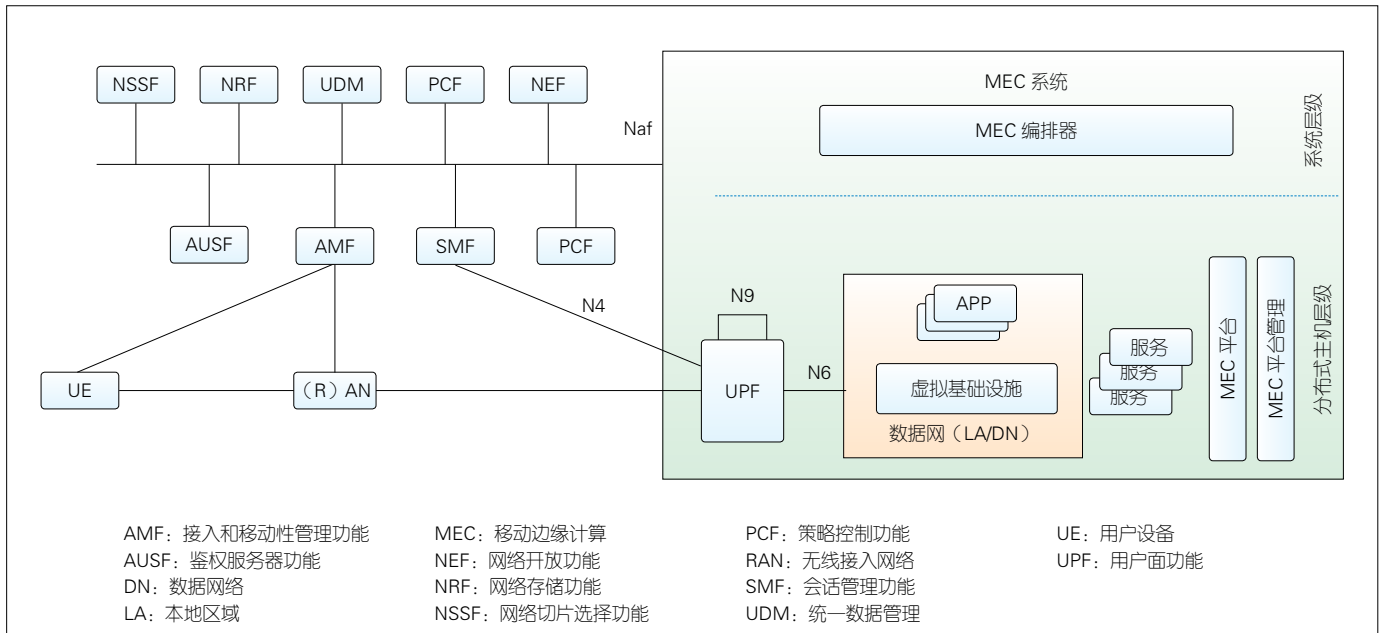
MEC 是 5G 的核心技术之一, 提供连接 + 计算的能力。MEC 将云计算从中心扩展到边缘, 实现算力延伸, 更加地贴近用户。5G 网络集成 MEC 部署 (具体见图 7), 主要体现在 UPF 下沉至 MEC 节点, 并将控制面网络开放功能 (NEF)、策略控制功能 (PCF)、SMF 等网元中心集中部署。MEC 应用编排 (MEAO) 对应于第三方应用功能 (AF), 可通过 NEF 或

PCF 进行交互, 完成分流规则的影响与配置。SMF 集中地对流量的调度, 通过数据网络名 (DNN)、上行分类器 (ULCL) 或者 IPv6 多归属等方案<sup>[7]</sup>实现边缘 UPF 的选择及特定数据业务分流。会话管理、QoS 管理、连续性管理、计费、监听等遵循 5G 核心网流程。5G MEC 的部署编排系统应与 5G 网络管理和编排 (MANO) 统一考虑, 并与编排器进行融合。MEC 能力开放应与 NEF 能力开放采用统一接口, 支持边缘侧网络能力开放。

5G 网络将以核心 / 大区、本地、边缘三级 DC+ 基站机房为基础架构, 虚拟化网元功能可按照场景部署在网络相应的位置上, 满足各种低时延高带宽的业务, 如表 2 所示。通过在运营商站点机房、边缘 DC 包括接入机房和汇聚机房部署 MEC 平台和上层 APP 应用, 使 MEC 更加贴近用户侧, 实现更低的时延, 以及流量就近转发, 以满足车联网、AR/VR、高清视频、云办公、智能家居等各种各样的垂直行业应用, 实现多种制式、融合接入、



▲图 6 5G 局域网架构图



▲图 7 移动边缘计算与 5G 网络的集成

开放平台。

基于 5G 网络拓展边缘云，可以充分发挥连接和网络的优势，整合云、网、边、端能力为行业客户提供一体化服务，同时开拓更多的创新应用。5G 网络和边缘计算结合的优势体现在如下几点：

- 1) 连接优势，全覆盖、多样化的连接是运营商进入边缘计算领域的核心切入点；
- 2) 网络优势，高可靠、低时延、大带宽、多连接、确定性以及业务安全的 5G 网络用户面是边缘计算的核心锚点；
- 3) 边缘优势，基于网络云打造边缘 ICT 融合资源池，向平台和应用综合服务能力延伸，实现性能和成本最优。

### 2.5 自动化运维技术

5G 核心网全云化的部署是以云为核心对网络进行规划，并通过云 + 网

提供一体化的服务，为客户到云、云到云提供最短路径、最优体验和最高安全可靠的保障。引入自动化工具链来解决网络快速部署，如图 8 所示，可以使得网络部署速度跟上云业务“分钟级”开通的需要。

通过打通规划、建设、运维和优化整个流程，并集成整个工具链，实现 5G 核心网虚拟化建设的规划设计、网络部署和验收测试的自动化，大幅缩短网络建设时间。同时，通过友好的用户交互界面在网络集成的全生命周期中实现工具功能与客户需求之间的“零距离”，有效解决了运营商在虚拟化网络部署和运维中的痛点。

- 1) 设计工具：通过图形用户界面（GUI）界面汇总硬件、云平台、MANO 及 NF 部署所需配置参数和资源要求，自动生成集成场景组件实例化参数文件和设计文档；
- 2) 部署工具：接收设计工具生

成的实例化参数文件，完成硬件、云平台、MANO 及 NF 的部署，并完成 NF 局数据配置；

3) 运维工具：在云平台、MANO、NF 完成部署后，日常维护支持根原因分析（RCA）多层故障告警关联，自动巡检网络实时状态，故障自愈以及自动派单处理；

4) 网优工具：实时保障网络的质量，通过对网络关键性能指标（KPI）质量监控和对比，支持资源的重新分配，按需弹性扩容和优先级调度。

### 3 5G 应用探索

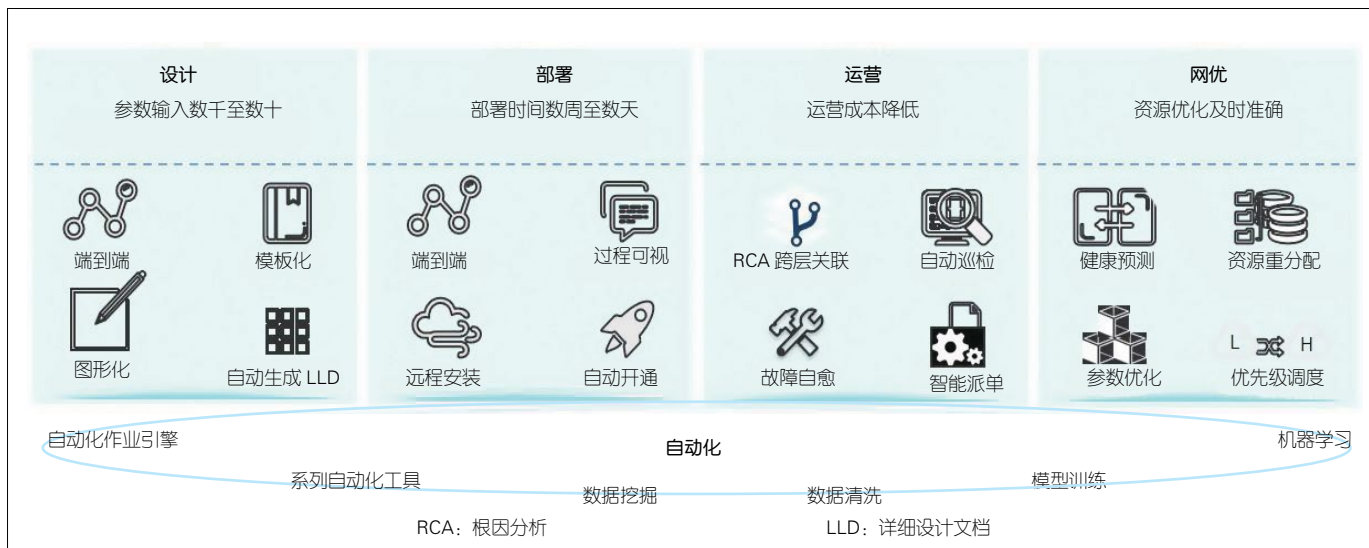
5G 应用并不能一蹴而就，还需一定时间。5G 建设初期，主要依赖大视频、云游戏等 eMBB 应用；近期，聚焦 MEC 园区网；远期，聚焦垂直行业使能技术，拓展 URLLC/mMTC 行业市场。2019—2020 年，5G 在全球各区域均开展了试点部署，尤其是在中国市场：通过头部行业试点探索，挖掘 5G 的典型应用，获得了显著的成果。下面，我们重点介绍 5G 在工业、教育、医疗、电力和车联网等方面的应用。

1) 5G+ 工业：基于端到端切片 +MEC 开展 5G+ 工业的建设，可为企

▼表 2 不同边缘场景下的业务分析

	场景 1	场景 2	场景 3
用户距离（密集城区）/km	2~3	< 5	10~20
业务时延 /ms	5	5~10	<20
典型业务	车联网、工厂	视频直播、园区	vCDN、VR 云游戏等

vCDN: 虚拟内容分发网络      VR: 虚拟现实



▲图 8 端到端自动化流程

业快速构建起高安全隔离的行业虚拟专网。

(1) 园区数据访问安全: MEC 实现数据的本地存储, 关键数据内部传输不出园区, 并且与公网隔离以保证安全性。

(2) 生产采集数据快速分流: 用户面下沉到边缘, 提供稳定的高带宽、低时延的网络质量, 同时将采集数据快速分流到工业互联网分析平台, 为生产提供分析、告警、判决、调整等决策建议。

2) 5G+ 教育: 场景化应用的增多, 推动了教育的升级。

(1) 远程 VR/AR 教室利用 5G 的大带宽、低时延特性: 结合 5G 核心网转发面硬件的加速优化创新技术, 较好地满足了远程 VR/AR 教室的网络需求, 实现了远程教育“真人”化, 使得在家上课也能享受与现场一样的体验。

(2) 5G 智慧校园: 通过高清监控、人脸识别提供了业务层的解决方案, 但这些新技术需要更好的网络支撑才能发挥最大功效。通过部署增强的校园 MEC 平台, 利用 5G LAN 技术, 构建了一张大带宽、高可靠的强本地网, 为智慧业务落地提供了坚实的网络基础设施。

3) 5G+ 医疗: 网络切片和低时延保障技术的结合, 解决了远程医疗安全性和性能瓶颈。

(1) 借助于 5G 网络切片, 可以将医院办公等普通业务与远程会诊等高安全业务分别部署不同的专用网络, 彻底进行隔离, 确保了远程会诊网络的安全性。

(2) 借助本地化的医疗 MEC 平台 /TSN 等技术, 实现了远程医疗“最后一公里”的超低时延保障。

4) 5G+ 电力: 生产、园区管理、

办公等差异化较大的业务需求, 可以通过切片等技术满足电力生产管理的转型升级。

(1) 基于 5G 切片的隔离增强技术, 构建完全隔离的电力生产专网, 确保生产不受干扰。

(2) 引入本地化的电力 MEC 平台, 将园区管理应用全部本地化部署, 并利用 5G 无线大带宽接入、MEC ICT 资源共用、MEC 平台即服务 (PaaS) 能力开放、NPN 等创新技术手段, 实现了园区管理智能化高安全运转。

(3) 办公系统全部上云, 并利用边缘云资源部署办公本地化系统, 实现办公系统的云边协同, 上云的同时也确保了办公体验不下降。

5) 5G+ 车联网: 加速自动驾驶网联化, 提升交通安全和效率。5G 自动驾驶是基于摄像头、雷达、全球定位系统 (GPS) 定位、视觉计算等单车智能化技术, 结合 5G 网络切片、MEC 等新一代信息技术完成“车-路-人”网联协同, 实现智能化交通。

(1) 车路协同安全辅助: MEC 实时接收路侧摄像头、雷达、红绿灯等智能设备上传的信息, 并提供视频、信号等处理分析所需要的算力资源和云边交互的通信路径。

(2) 自动驾驶协同感知控制: 用户面采用硬件加速技术并下沉边缘, 将核心网侧的转发时延由 0.5 ms 降低至 0.2 ms, 同时 URLLC 双会话采用不同切片保障低时延高速移动场景下业务的连续性和高可靠性实现自动驾驶协同。

#### 4 结束语

5G 核心网作为连接消费互联网和产业互联网的中央处理器, 提供全云化、用户面加速、一体化 MEC、行业

赋能技术包、多维切片、E2E 自动化等全系列特性, 统一调度全网连接资源, 赋能千行百业的创新, 助力各行业的数字化转型。

#### 参考文献

- [1] ITU-R. IMT Vision-framework and overall objectives of the future: recommendation ITU-R M.2083-0(09/2015) [S]. 2015
- [2] 3GPP. Enhancements of dedicated core networks selection mechanism: TS 3GPP 23.711[S]. 2015
- [3] The vector packet processor (VPP) how VPP Works[EB/OL].[2020-03-07]. <https://fd.io/vppproject/vpptechn/>
- [4] 朱河清, 梁存铭, 胡雪煜, 等. 深入浅出 DPD-KIM. 北京: 机械工业出版社
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system;stage 2: 3GPP TS23.501[S]. 2018
- [6] 工业互联网产业联盟 AII: 时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书 (征求意见稿) [R]. 2019
- [7] ETSI. ETSI White Paper No.28: MEC in 5G networks[R].2018

#### 作者简介



陆光辉, 中兴通讯股份有限公司电信云及核心网产品首席架构师; 从事 5G、SDN/NFV、电信云研究, 以及核心网产品规划。



毛磊, 中兴通讯股份有限公司电信云及核心网产品规划经理; 从事 5G 核心网、虚拟化、网络切片、MEC 等方面的工作。



冯建业, 中兴通讯股份有限公司电信云及核心网产品规划总监; 负责电信云及核心网产品方案规划及市场研究工作。



# 网络融合深化使能 5G 全场景多维度服务

## Deep Network Convergence Enables 5G Full-Scene Multi-Dimensional Service

孙滔 /SUN Tao, 陆璐 /LU Lu, 刘超 /LIU Chao

(中国移动研究院网络与 IT 技术研究所, 北京 100053)  
(Institute of Network and IT Technology, China Mobile Research  
Institute, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003011

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200624.1610.006.html>

网络出版日期: 2020-06-24

收稿日期: 2020-04-06

**摘要:** 5G R16 标准已经发布, 使得 5G 预期解决增强移动宽带 (eMBB)、超可靠低时延通信 (URLLC)、海量机器类通信 (mMTC) 的标准初步完备。以网络融合为主线, 从固定移动融合、空天地一体化融合、通信技术 (CT) /运营技术 (OT) 融合这 3 个角度, 分析 5G 架构在网络融合的深度及广度上的发展趋势, 同时指出了 5G 面向 R17 的关键演进方向。认为网络融合技术的复杂性和融合的深度有关, 不能因为网络融合复杂而放弃技术和应用的融会贯通。

**关键词:** 5G; 固定移动融合; 空天地一体化; 工业互联网

**Abstract:** R16 for 5G has been released, which makes the standards of enhanced mobile broadband (eMBB), ultra reliable low latency communications (URLLC) and massive machine type of communication (mMTC) preliminarily complete. Targetting the description of 5G evolution from network convergence perspective, the trend of 5G architecture design is analyzed from three main angles: fixed mobile convergence, space-aerial-terrestrial integration and communication technology (CT) and operation technology (OT) integration. Through the analysis of network from convergence and integration aspects, the key evolution direction of 5G towards R17 is pointed out. It is considered that the complexity of network convergence technology is related to the depth of integration, and the integration of technology and application should not be abandoned because of its complexity.

**Keywords:** 5G; fixed mobile convergence; space-aerial-terrestrial integration; industrial Internet

### 1 在 5G 独立组网 (SA) 商用元年 审视 5G 发展的走向

移动通信技术发展的魅力是其代际的更替。10 年一代的蜂窝网“摩尔定律”让从事移动通信技术的研发人员无法停下前进的脚步。思考 5G 技术发展的过程, 同时展望后 5G 技术的演进将具有重要的意义。这对指导我们实践 5G 应用以及拓展 5G 技术的边界至关重要。

2020 年是 5G 独立组网商用的元年。中国、韩国等国家的运营商都已经表示将在 2020 年进行 5G SA 网络的商用。作为产业链中特别重要的一

环, 5G SA 能力的终端也将更加丰富多样。5G 网络可以避免对 4G 的强依赖, 提供端到端更高性能及更灵活的连接服务。

5G 技术从被提出以来就一路坎坷。技术标准的分歧、架构的多样、非技术因素的干扰, 甚至 2020 年爆发的新冠疫情都使得 5G 的发展命运多舛; 然而, 好的技术不会被埋没, 这些困难并不能阻碍 5G 的发展。作为全球 5G 的排头兵, 中国运营商在过去几年通过建设全球最大规模的 4G 网络带来了巨大红利。相信 5G 的新发展必将为我们的生产生活带来翻天覆地的变化<sup>[1]</sup>。

### 2 从融合的角度分析 5G 架构的 演进

网络的融合是移动通信技术一直追求的重要主题。标准化组织 3GPP 在 3G 时代就开始对融合的网络架构进行标准化, 对 3GPP 标准定义的蜂窝网 (简称 3GPP 网络) 和非 3GPP 定义的网络 [简称非 3GPP 网络, 如码分多址 (CDMA)、无线局域网 (WLAN) 等] 进行了融合的架构设计。在 4G 时期, 网络的融合架构更加全面, 既考虑了可信和非可信的接入类型, 也考虑了实现融合所采用的不同技术, 如基于终端的协议和基于网络的协议<sup>[2]</sup>。以 T-Mobile USA 为代表的运营商在其

网络中部署了对非可信 WLAN 接入支持的能力, 实现了基于 Wi-Fi 的语音通话的业务<sup>[3]</sup>; 然而, 由于不可信的融合方案需要终端与网络建立 IPSec 安全隧道, 对终端能力的要求高, 导致产业支持度一直不好。Apple 公司在 2013 年的 iOS7 系统中引入了对多路径传输控制协议 (MPTCP) 的支持<sup>[4]</sup>, 用以提升其 Siri 应用识别语音的业务体验。这是 4G 时代又一个网络融合与协同的标志性进展, 它不仅提升了网络对应用的响应速度, 还能辅助用户在蜂窝网和 Wi-Fi 网络平滑灵活地切换。随后几年, Apple 公司把 MPTCP 扩展到其他应用中, 例如 Apple Map 等。

网络融合是 5G 发展的内在需求, 在后 5G 阶段将持续深化。5G 网络架构的融合设计来自 3 个主要驱动力:

1) 增强网络接入带宽。以多接入能力、4G/5G 融合为代表, “网络总是拥塞的”在任何时代都是成立的。新冠肺炎 (COVID-19) 在欧洲爆发后, YouTube 将欧盟和英国的视频降为标清, 以避免成千上万的欧洲人在家工作导致网络崩溃。此前, Netflix 也宣布降低在欧洲播出的一切流媒体视频质量和大小。4G/5G/Wi-Fi/ 固网仍然是提升带宽最直接的手段, 因此, 这些网络的融合与协同仍然非常重要。

2) 提升运维管理效率。对于提供固网和移动网的全业务运营商来说, 依托蜂窝网在接入管理、控制、计费等一系列的优势, 实现统一运维是降本增效的重要手段。此外, 统一运营也有利于实现用户业务体验的一致性和综合网络服务能力, 从而增强用户粘性。

3) 扩展网络服务的场景。5G 最主要的特征是服务垂直行业能力的扩展, 这也体现在网络架构的融合上。从地面接入为主到融合卫星接入, 从面向为人服务为主扩展到面向生产和

制造的服务。这就需要网络支持生产制造场景下的数据传输类型及特有的场景。本文中, 我们对扩展的网络服务场景进行了分析和介绍。

### 3 网络架构深化融合促进 5G 服务能力扩展

#### 3.1 在能力三角的基础上继续提升网络能力

从 2016 年开始, 3GPP 定义了 R15 和 R16 两个 5G 国际标准的版本, 用接近 5 年的时间完成了 5G 面向 3 大典型业务场景的技术研究及标准化。在这个过程中, 5G 网络一直将网络融合作为重要的特性在不断增强和发展。

#### 3.2 固定移动融合

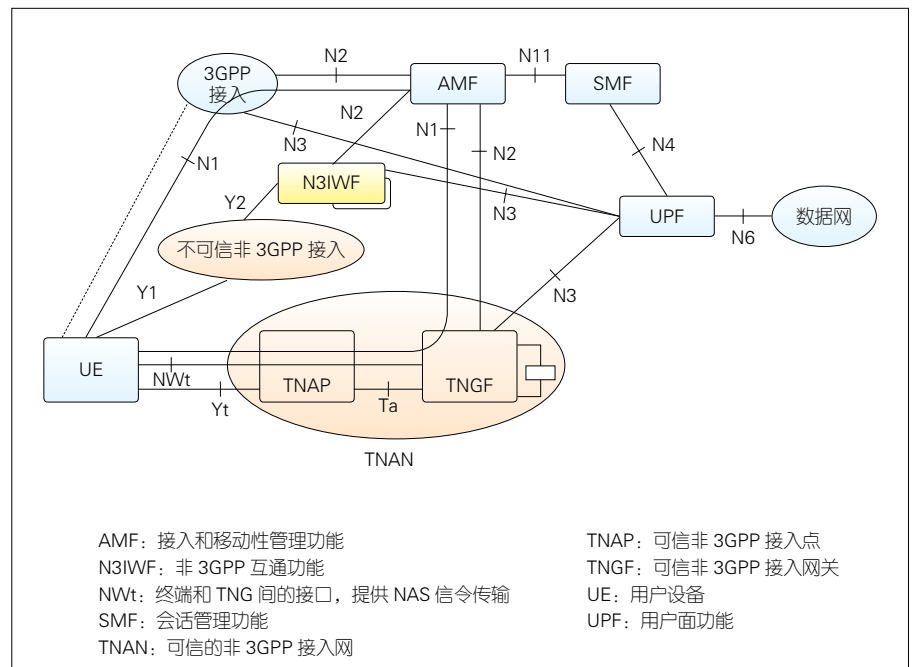
“内生的融合”是 5G 系统设计之初的目标<sup>[5]</sup>。5G 设计之初, 宽带论坛 (BBF) 与 3GPP SA2 (系统架构组) 在 2017 年 2 月召开了联合会议。运营商希望 5G 具备统一接入的能力, 实现“接入无关性”。这就要求不同的接

入方式统一使用 3GPP 的接入标准: 终端采用 N1 (5G NAS) 协议, 接入网采用 3GPP 定义的 N2 (控制面) 和 N3 (用户面) 接口。在具体方案设计时, 考虑到现有旧的设备 (如固网的家庭网关) 难以升级, 3GPP 进行了折中的架构设计。

根据安全程度、接入类型、终端能力这 3 个维度, 固定移动融合分成多种接入架构。3GPP 在 R15 定义了非可信接入的场景, 在 R16 进行扩展支持了可信接入及固网接入的场景。

1) 从安全程度来看, 分可信接入及非可信接入, 如图 1 所示。可信接入是指该接入网与运营商的网络同属于一个安全域, 终端通过可信接入网关 (TNGF) 后能直接接入 5G 核心网 (5GC)。在非可信接入场景下, 接入网需要通过“互通功能” (N3IWF) 后再接入 5GC。

2) 从接入类型看, 分无线接入 (如 Wi-Fi) 和固定接入 (固定宽带接入, 如家庭网关)。蜂窝网和 Wi-Fi 网络的融合能力是相对完善的, 也是最主



▲图 1 可信及非可信非 3GPP 接入架构

要的场景。随着 Wi-Fi 6 能力的引入和北美对非授权频段的支持，我们可以预见，Wi-Fi 与 5G 的融合仍将是重要的融合能力。在对 Wi-Fi 融合接入支持的基础上，3GPP 在 R16 定义了固定接入（家庭网关）接入 5G 核心网的架构<sup>[2]</sup>。

3) 从终端能力来看，终端通过非 3GPP 接入 5GC 时，又分为具备或不具备 5G 信令（NAS）能力两种类型，如图 2 所示。5G 家庭网关（5G-RG）是一类新的终端，具备 5G NAS（N1 接口）信令能力，能接入 5G 核心网，对 5G 网络来说可以被看作一个 5G 终端。固网家庭网关（FN-RG）代表一类旧的、非原生 5G 接入的终端，本身不支持 5G 信令，需要通过有线接入网关（W-AGF）的 5G 信令接入 5G 核心网。

在网络融合接入中，终端具有很大的主动性。终端将根据诸如设备配置、用户偏好、历史记录、当前可用的网络信息等因素选择是通过可信还是非可信的方式接入网络。不论终端选择了可信还是非可信的接入，终端的接入和移动性管理功能（AMF）仍然是唯一的。虽然终端和网络的信令参考点 N1 是两个（非 3GPP 的 N1 连接与 3GPP 的 N1 连接），但是只要公用陆用移动网（PLMN）是同一个。

终端无感知的网络融合方式仍将是后续技术发展的方向。从 3G/4G 的网络融合的应用来看，终端的数量大、种类多、能力参差不齐等因素往往是制约网络融合统一的关键；因此，尽可能降低对终端的影响、降低用户使用的难度、避免业务体验的影响，往往是运营商选择融合方案实施的主要考量之一。

### 3.3 空天地一体化融合

4G 引入的“永远在线”是指终端开机即完成注册认证、地址分配、连

接建立的过程，以便于快速地发起数据业务；然而，在偏远地区、海上、沙漠/草原等特殊环境下，缺少了基站的覆盖，这种“永远在线”也不复存在。卫星接入可以让 5G 终端解决这些场景下的接入问题。

卫星接入与 5G 的融合在 3GPP 进行 5G 设计之初就受到了很高的关注。众多卫星公司如休斯公司等，都已积极参与到 3GPP 的 5G 系统设计中，在 R15 的周期内研究了卫星接入的空口信道<sup>[6]</sup>，并在 R16 周期内对卫星接入的网络融合架构进行了研究<sup>[7]</sup>。卫星接入正式的标准制订已在 R17 启动。这既涉及接入网的工作，也涉及核心网架构的工作。

卫星网络主要通过两种方式与地面移动网络进行融合，即卫星作为非 3GPP 无线接入技术（RAT）或 3GPP RAT 接入到 5G 核心网。卫星作为非 3GPP RAT 接入时，可参考 3.2 节所讨论的方式。卫星作为 3GPP RAT 接入时，如图 3 所示，卫星的空口采用 3GPP 增强协议，基站的部分或全部功能部

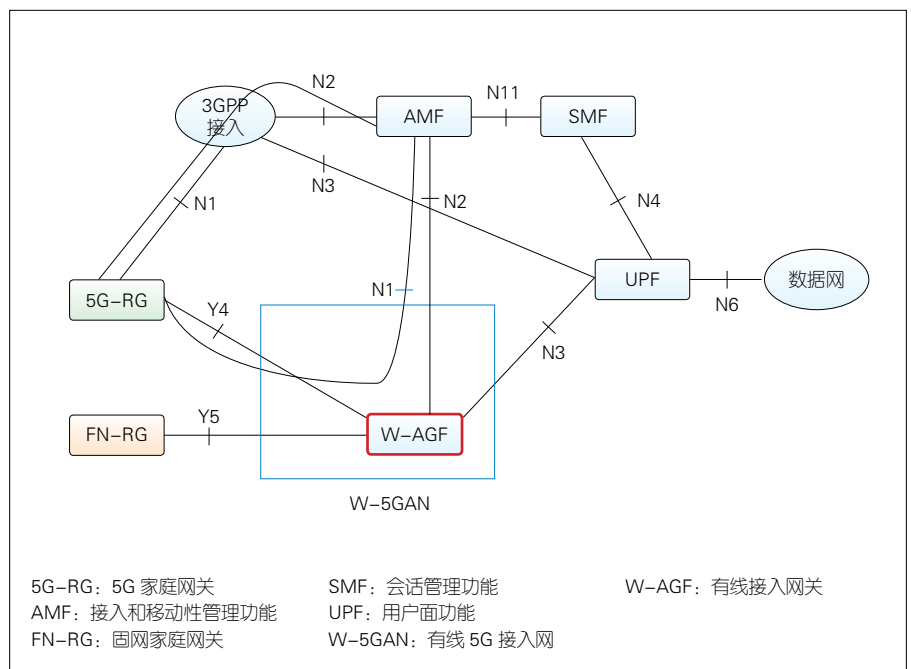
署在卫星上。5G 核心网对功能、接口进行增强和优化以适应卫星接入的特点。卫星作为 3GPP RAT 接入 5G 核心网时，存在如下 3 种可能的组网方案<sup>[7]</sup>。

方案 1：卫星作为基站的射频拉远单元，透明传输地面基站和终端之间的无线信号。卫星和终端以及卫星和基站之间采用 3GPP 的空口；

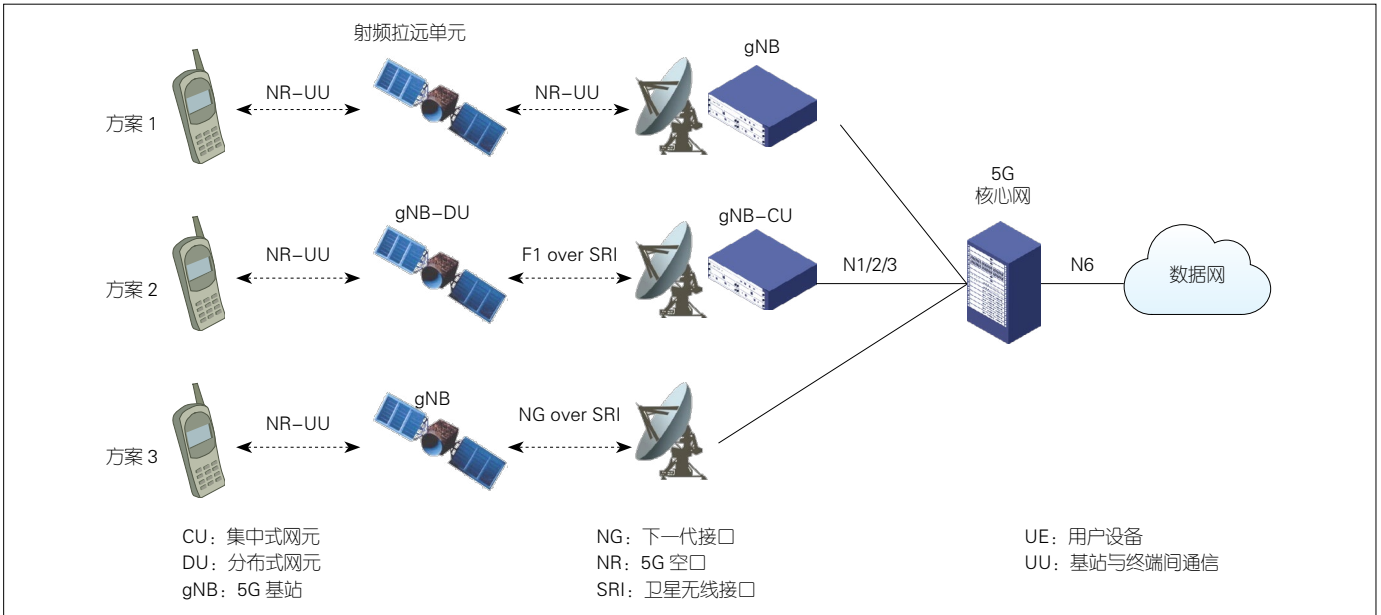
方案 2：分布式单元（DU）和集中式单元（CU）间的前传接口通过卫星无线空口（SRI）传输，卫星具备基站的部分功能，5G 基站的 DU 部分部署在卫星上，卫星和地面基站的核心网共用，但需要进行移动性管理、会话管理等功能增强；

方案 3：基站与核心网间的接口（N2/N3 接口）通过卫星空口传输。卫星具备 5G 基站的全部功能，DU、CU 均部署在卫星上，卫星和地面基站的核心网共用。

除了卫星接入的融合，5G 为空中无人机的接入及管理也提供了基础手段。美国联邦航天管理局（FAA）在 2019 年 12 月<sup>[8]</sup>发布了对航空飞行器



▲ 图 2 不同能力的家庭网关接入 5G 核心网的架构



▲图 3 卫星作为 3GPP RAT 和移动网络融合架构

的监管要求，要求在美国的无人机飞行器都能对其标识进行辨识、对飞行器的飞行进行跟踪。3GPP 在 R17 也启动了无人机控制的项目 (UAS)，通过设计无人机管理架构来实现对无人机飞行器的连接、标识和跟踪。

### 3.4 面向工业互联网的通信技术 (CT) 与运营技术 (OT) 融合

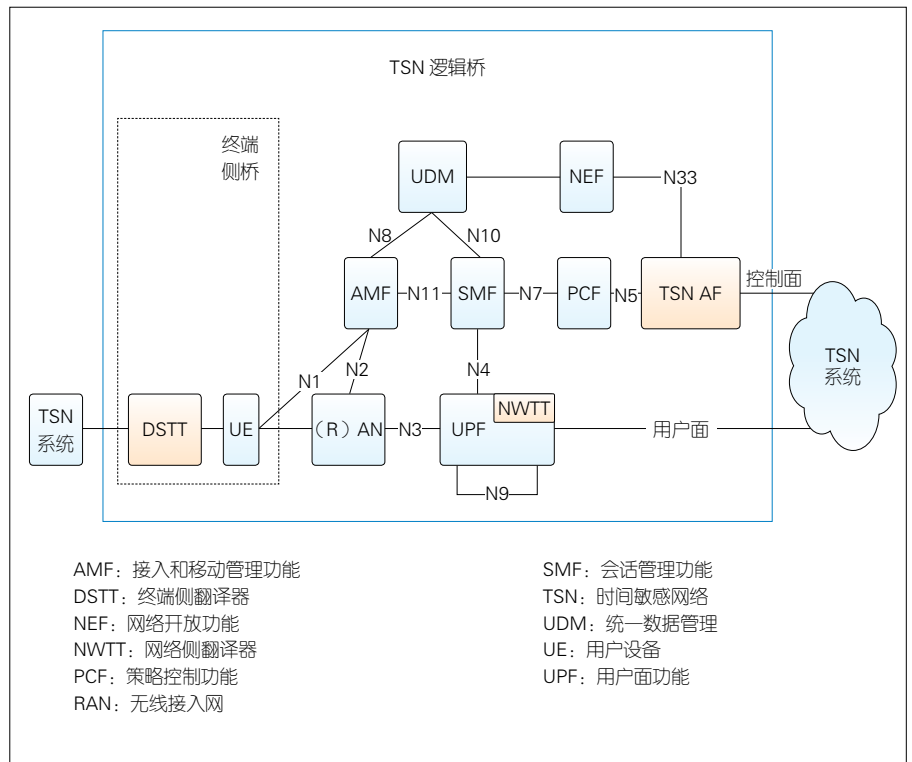
工业互联网越来越被认为是 5G 的重要应用场景之一，这在 5G 标准的后续版本中得到了充分体现。例如，5G 局域网 (5G LAN, R16) 和工业互联网 (IIoT, R17) 在 3GPP 得到了产业界众多公司的支持。这是 CT 网络与 OT 网络的融合在 5G 网络上最直观的反映。

对工业互联网的支持需要 5G 能够为多种工业场景下的数据传输提供通道。事实上，5G 在第一个版本 (R15) 中就提供了以太网的支持<sup>[9]</sup>。ETSI 在 2020 年 4 月也成立了非 IP 网络 (NIN) 的工作组<sup>[10]</sup>，其目的是为 5G 的应用场景研究比 IP 更适合的协议。在这之前，ETSI 已经完成了“下一代协议

(NGP)”的研究工作。NIN 指出，在 70 年代 IP 协议被用来固定网络传输文本，在 5G 时代需要研究非 IP 技术来应对诸如降低音视频及体感网的时延、现场对海量接收者的直播、网

络服务可持续保障、更高效的频谱和处理能力的使用等。

3GPP 在 R16 引入了对时间敏感网络 (TSN) 的支持，如图 4 所示。5G 系统对外表现为 TSN “逻辑桥”，



▲图 4 卫星作为 3GPP RAT 和移动网络融合架构

即作为一个黑盒呈现。在控制面，AF 作为翻译器，用于适配 5G 系统接口和 TSN 协议及参数。在用户面，5G 系统通过 TSN 的翻译器（终端翻译器 DSTT 和网络翻译器 NWT）向 TSN 网络提供 TSN 端口特性。在实现方式上，NWT 和转发面网元（UPF）合一部署，DSTT 和终端合一或者独立部署。

需要指出的是，3GPP R16 对 TSN 的支持仍然非常有限。3GPP 从 IEEE 的约 26 个 TSN 典型协议中选择支持最基本、相对简单的 5 个协议：IEEE 802.1Qbv(出口门控列表)、802.1AS(时间同步)、802.1Qci(入口的流过滤)、802.1AB(网络拓扑发现)、802.1Qcc(网络管理模型)<sup>[9]</sup>。

以 TSN 为代表的 CT 与 OT 融合技术将是一个长期的过程。TSN 的技术本身仍在发展中：IEEE 在 2018 年以来陆续发布相关技术标准并将继续丰富完善；相关产业发展仍有较长的路要走，TSN 控制器的实现复杂性高。在应用时，考虑到时间同步、时延、维护业务转发状态等方面的要求<sup>[1]</sup>，TSN 初期应用在小范围网络中。5G 对以 TSN 为代表的行业应用的支持仍在继续增强。R17 的 IIoT 项目研究者将对支持 TSN 的上行时间同步、多时钟域、终端直接通信（通过用户面网关）、对时间同步及确定性业务能力的开放等方面开展进一步研究工作。

## 4 结束语

网络融合是移动通信实现接入能力兼容并包、技术变革升级的重要途径。5G 在网络融合的道路上有了更深入的发展，未来网络的应用也必将证明这一点。蜂窝网络的演进，特别是网络架构的演进，总是不断借鉴 IP、IT、OT 等领域的新技术。除了上述列

举的例子，我们可以从众多其他例子中看到端倪，如 3GPP 在 R16 中所引入的 5G LAN 技术就是对 WLAN 网络的本地组网、灵活易用能力的借鉴。

通过技术融合，移动通信也将实际更迭的红利带给相关技术领域。移动通信在兼容新的网络技术时也促进了相关领域技术的革新。例如，4G 时代蜂窝网与 Wi-Fi 的融合对 Wi-Fi 的无感知认证、Wi-Fi 电话等技术起到促进作用。

应用与实践是检验网络融合成功与否的最重要标准。这不仅涉及到网络的支持，也涉及到终端、接入网、承载网的支持。系统融合的技术瓶颈往往不是网络，而是数量更多、更靠近用户的终端。网络融合技术的复杂性和融合的深度有关，即是达到业务逻辑统一的深度融合，还是仅实现系统间互通的简单融合。需要指出的是，技术并不是决定性因素，网络融合所带来的管理组织结构的融合、产业链的融合发展影响更深刻。“求其上者得其中”，我们不能因为网络融合复杂而放弃技术和应用的融会贯通。

### 参考文献

- [1] 李正茂, 王晓云, 张同须, 等. 5G+: 5G 如何改变社会 [M]. 北京: 中信出版社, 2019
- [2] 3GPP. Architecture enhancements for non-3GPP accesses: TS 23.402[S]. 2020
- [3] T-Mobile. Every Wi-Fi connection works like a T-Mobile tower[EB/OL]. [2020-06-16]. <https://www.t-mobile.com/offers/wifi-calling-wifi-extenders>
- [4] Apple. Use multipath TCP to create backup connections for iOS[EB/OL]. (2017-08-04) [2020-06-16]. <https://support.apple.com/en-us/HT201373>
- [5] NGMN. NGMN 5G white paper[EB/OL]. (2015-03-03)[2020-06-16]. <https://www.ngmn.org/publications/ngmn-5g-white-paper.html>
- [6] 3GPP. Study on new radio (NR) to support

- non-terrestrial networks: TR 38.811[S]. 2018
- [7] 3GPP. Study on architecture aspects for using satellite access in 5G: TR 23.737[S]. 2018
- [8] USA Federal Aviation Administration. Remote identification of unmanned aircraft systems[EB/OL]. (2019-12-31)[2020-06-16]. <https://www.federalregister.gov/documents/2019/12/31/2019-28100/remote-identification-of-unmanned-aircraft-systems>
- [9] 3GPP. System architecture for the 5G System (5GS): TS 23.501[S]. 2020
- [10] ETSI. Non-IP-Networking[EB/OL]. [2020-06-16]. <https://www.etsi.org/technologies/non-ip-networking>
- [11] 赵福川, 刘爱华, 周华东. 5G 确定性网络的应用和传送技术 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 62-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.201905010

### 作者简介



**孙滔**, 中国移动研究院主任研究员、高级工程师, 网络与 IT 技术研究所网络创新实验室室经理, 3GPP SA2 副主席; 主要从事移动通信网络架构、网络融合、网络智能化、5G/6G 等网络新技术的研发工作; 从 2009 年开始代表中国移动参加 3GPP 会议, 作为报告人完成 5G 架构的研究和标准制订工作。



**陆璐**, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所副所长、高级工程师, CCSA TC5 核心网组组长, ITU-T SG13 WP1 副主席; 主要从事移动核心网策略、演进、标准和技术研究工作, 在 5G 网络架构、网络智能化、边缘计算、网络切片以及未来网络架构等领域有深入研究。



**刘超**, 中国移动研究院网络与 IT 技术研究所核心网研究员; 长期从事 TD-LTE、NB IOT、5G 核心网等领域的技术攻关、研究和标准化工作。





# 6G 技术挑战、创新与展望

## Challenges, Innovations and Perspectives Towards 6G

方敏 /FANG Min<sup>1,2</sup>  
段向阳 /DUAN Xiangyang<sup>1,2</sup>  
胡留军 /HU Liujun<sup>1,2</sup>

(1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;  
2. 移动网络与移动多媒体技术国家重点实验室,  
广东 深圳 518057)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;  
2. State Key Laboratory of Mobile Network and  
Mobile Multimedia, Shenzhen 518057, China)

**摘要:** 梳理了全球 6G 技术研究现状, 初步预估了 6G 需求、技术与标准研究工作路标, 分析了面向 6G 网络的未来业务发展趋势和典型服务用例, 构建了 6G 网络服务愿景、基本性能需求, 以及基于架构、链路、空域、流域、推理与计算维度的 6G 使能技术框架。认为 6G 潜在使能技术包括自治自动网络、智能三维连接、智能大规模天线阵、按需网络拓扑与计算、超硅计算与通信。重点介绍了中兴通讯服务架构无线接入网络 (SBA-RAN)、平滑虚拟小区技术 (SVC)、智能反射表面多输入多输出技术 (IRS-MIMO) 与增强多用户共享接入 (eMUSA) 等 6G 创新技术实例, 揭示了 6G 相对 5G 是“演进”还是“革命”网络的决定要素是维持摩尔定律可持续发展的超硅计算技术, 并展望了 5G 演进网络中将广泛应用的 Pre6G 创新技术。

**关键词:** 6G; 智能无线电; 服务架构无线接入网; 三维连接; 软件定义空口; 智能反射表面; 平滑虚拟小区; 增强多用户共享接入

**Abstract:** The global research progress of 6G network is briefly introduced and the tentative timeline of 6G requirements, technology and standard research is illustrated. The future traffic trend and typical use cases towards 6G network are investigated preliminarily. The vision and the key performance requirements as well as the potential enablers in the architecture, link, flow, inference and computing dimensions are established towards 6G network. The 6G potential enablers including self-driving network, the intelligent 3D-connectivity, the intelligent large-scale antenna array, the on-demand network topology and computing, as well as the beyond silicon computing and communication are introduced. Some innovation instances towards 6G from ZTE Corporation are presented such as the service-based radio access network (SBA-RAN), the smooth virtual cell (SVC), the intelligent reflective metasurface multiple input multiple output (IRS-MIMO) and enhanced multi-user shared access (eMUSA). It's revealed that whether the 6G is an "evolution" or "revolution" network of 5G is mainly determined by the innovations of beyond-silicon computing which could maintain the sustainable development of Moore's law. Finally the pre6G innovation technologies that will be widely used in the evolved 5G network are forecasted.

**Keywords:** 6G; intelligent radio; service-based radio access network (RAN); 3D-connectivity; software-defined air interface; intelligent reflective metasurface; smooth virtual cell; enhanced multi-user shared access (eMUSA)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200702.1418.002.html>

网络出版日期: 2020-06-24

收稿日期: 2020-04-10

6G 网络是指 2030 年将要商用的移动通信网络。1980—2020 年移动通信网络“十年一代”的发展历程, 见证了 3G 移动用户超越固定用户的“辉煌十年”, 体验了 4G 移动互联改变生活的“美好十年”, 开启了 5G 万物互联改变社会的“创新十年”。未

来“创新十年”中, 5G 商用网络将在业务与网络技术方面不断演进, 并最终向 6G 网络过渡; 因此 6G 也是 5G 长期演进网络。

### 1 6G 全球研究现状

随着 5G 网络成功规模商用, 全

球产学研已在 2019 年正式启动 6G 潜在服务需求、网络架构与潜在使能技术的研究工作。

#### 1.1 欧盟

欧盟企业技术平台 NetWorld2020 在 2018 年 9 月发布了《下一代因特网

中的智能网络》白皮书。在此基础上，欧盟将在 2020 年第 3 季度制定 2021—2027 年产学研框架项目下的 6G 战略研究与创新议程（SRIA）与战略开发技术（SDA），并在 2021 年第 1 季度暨世界移动通信大会上正式成立欧盟 6G 伙伴合作项目，在 2021 年 4 月开始执行第一批 6G 智能网络服务产学研框架项目。

### 1.2 芬兰

芬兰政府在 2018 年 5 月率先成立了芬兰奥鲁大学牵头管理的 6G 旗舰项目，项目成员以芬兰企业、高校与研究所为主，该项目计划在 2018—2026 年投入 2.5 亿欧元用于 6G 研发。芬兰奥鲁大学每年 3 月牵头组织召开了两届 6G 无线峰会，主要厂家与运营商均发表了 6G 技术峰会演讲，并在会上与会下技术讨论基础上于 2019 年 9 月发布了《面向 6G 泛在无线智能的驱动与主要研究挑战》白皮书。

目前 6G 无线峰会正在起草 12 个技术专题的 6G 技术白皮书，最快在 2020 年下半年发布若干技术白皮书，包括 6G 驱动与联合国可持续发展目标、垂直服务验证与试验、无线通信机器学习、5G 联网、宽带连接、射频（RF）技术与频谱、偏远地区连接、6G 商务、6G 边缘计算、信任安全与隐私、6G 关键与大规模机器通信、定位与传感。

### 1.3 美国

美国联邦通信委员会（FCC）在 2018 年启动了 95 GHz~3 THz 频率范围的太赫兹频谱新服务研究工作，从 2019 年 6 月开始发放为期 10 年、可销售网络服务的试验频谱许可。其频谱研究的主要内容包括：

1) 95~275 GHz 频段政府与非政府共享使用；

2) 275 GHz~3 THz 不干扰现有频谱使用；

3) 非许可频谱共 21.2 GHz 带宽，包括 116~123 GHz、174.8~182 GHz、185~190 GHz、244~246 GHz。

美国电信行业解决方案联盟（ATIS）在 2020 年 5 月 19 日发布了 6G 行动倡议书，建议政府在 6G 核心技术突破上投入额外研发资金，鼓励政府与企业积极参与制定国家频谱政策。目前，美国希望主导的未来 5G 与 6G 核心技术包括 5G 集成与开放网络（ION）、支持人工智能（AI）的高级网络和服务、先进的天线与无线电系统（例如 95 GHz 以上太赫兹频段）、多接入网络服务（包括地面与非地面网络、自我感应以支持超高清定位等应用）、智能医疗保健网络服务（包括远程诊断与手术，利用多感测应用、触觉互联网和超高分辨率 3D 影像等新功能）和农业 4.0 服务（支持统一施用水、肥料和农药）。

### 1.4 日本与韩国

日本政府将在 2020 年夏季发布 6G 无线通信网络研究战略。韩国政府电子与电信研究所（ETRI）在 2019 年 6 月与芬兰奥鲁大学签订了 6G 网络合作研究协议；三星自 2019 年开始重点研究 6G、人工智能与机器人技术；LG 在 2019 年 1 月与韩国科学技术研究所（KAIST）合作建立了 6G 研究中心；SKT 与厂家联合研究 6G 关键性能指标与商务需求。

### 1.5 中国

中国工业和信息化部已将原有的 IMT-2020 推进组扩展到 IMT-2030 推进组，开展 6G 需求、愿景、关键技术与全球统一标准的可行性研究工作。中国科学技术部牵头在 2019 年 11 月启动了由 37 家产学研机构参与的 6G

技术研发推进组，开展 6G 需求、结构与使能技术的产学研合作项目。

### 1.6 其他

中国移动在 2019 年 11 月发布了《6G 愿景与需求》白皮书，日本 DoCoMo 在 2020 年 1 月发布了《5G 与 6G 无线技术需求》白皮书。国际电联标准化部门（ITU-T）在部分产学研机构驱动下在 2018 年成立了 6G 需求与网络结构的研究项目即 IMT-2030 焦点组，该研究项目先后发布了《6G 技术蓝图、应用与市场驱动》《6G 新服务与网络服务能力》与《代表性用例和关键网络需求》等白皮书或技术研究报告。

## 2 6G 研究与标准工作路标预测

未来 10 年内 ITU、中国 6G 推进组与 3GPP 的 6G 标准工作路标预测，详见图 1。相应的基本判断是：

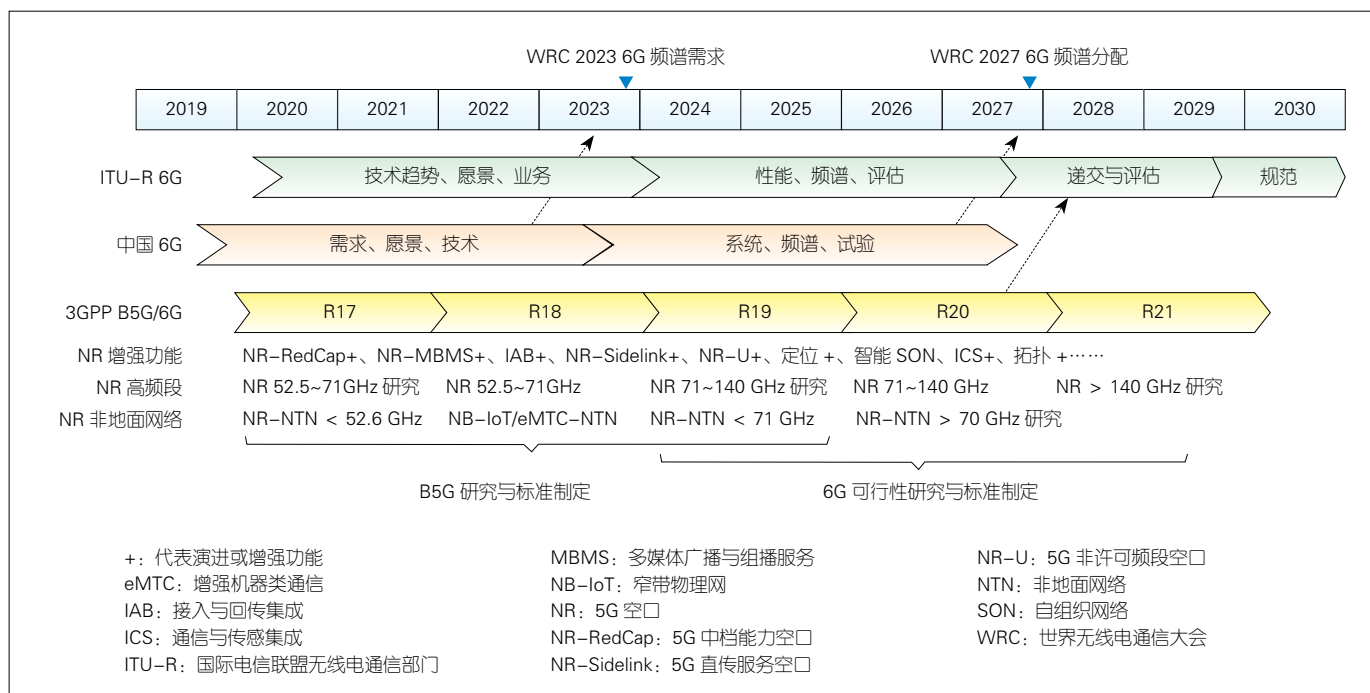
1) 2020—2023 年是 6G 业务、愿景、使能技术的可行性研究窗口；

2) 2020 年是识别 6G 使能技术的早期阶段。

国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）的 WP5D 工作组计划<sup>[1-2]</sup>在 2022 年 6 月完成《IMT 未来技术趋势》研究报告，在 2021 年 6 月—2022 年 11 月完成《IMT-2020 之后愿景》研究报告。预计 2023 年底的世界无线电通信大会（WRC）将讨论 6G 频谱需求，2027 年底的 WRC 将完成 6G 频谱分配。

中国 IMT-2030 暨 6G 推进组的 6G 业务、愿景与使能技术的研究和验证，将与 ITU-R 的 6G 标准工作计划保持同步。可以预测的是，在 2023—2027 年中国将完成 6G 系统与频谱的研究、测试与系统试验。

面向 2028—2029 年 ITU 6G 标准评估窗口，3GPP 预计需要在 2024—2025 年即 R19 窗口正式启动 6G 标准需



▲图1 B5G/6G 研究与标准工作路标预测

求、结构与空口技术的可行性研究工作，并最快在 2026—2027 年即 R20 窗口完成 6G 空口标准技术规范制定工作。此前，3GPP 将在 2020—2023 年完成 R17 与 R18 的 5G 演进标准制定，此阶段可简称为后 5G 即 B5G 标准。R17/18 5G 演进标准主要功能，包括面向未来演进移动宽带、固定无线接入、工业物联网、车联网、扩展现实（XR）、大规模机器通信、无人机与卫星接入等用例的演进空口与增强功能，例如 5G 高频段空口即 NR 52.6 ~ 71 GHz、5G 非地面网络空口（NR-NTN）与其高频段 NTN、蜂窝窄带物联非地面网络（NB-IoT/eMTC-NTN）、面向可穿戴与视频监控等中档终端的 5G 中档能力空口及其演进功能（NR-RedCap+）、5G 多媒体广播与组播服务空口及其演进功能（NR-MBMS+）、接入与回传集成演进功能（IAB+）、5G 直传空口及其演进功能（NR-Sidelink+）、5G 非许可频段空口及其演进功能（NR-U+）、定位增强功能、智能自组织网络及其演进功能、

通信传感集成及其演进功能（ICS+）、网络拓扑增强功能等。

### 3 6G 业务驱动与愿景

用户定义视频（如抖音）上行流量的便捷消费，机器视觉计算（如人脸识别）的广泛应用，扩展现实、光场与点云等光波全息传送的潜在消费，零距离虚拟现场交互（如异地“真人”二重唱或乐队“云演奏”）的出现，灵巧可靠的数字人/机车/机器人终端集群（如自动驾驶汽车）服务，以及联合国 2030 年可持续发展目标<sup>[1]</sup>逐步实施，都预示了人性化、全息交互、群体协作的业务发展趋势。

4G 与 5G、物联网、云边计算、AI 与机器学习（ML）<sup>[3-5]</sup>、大数据、区块链、卫星火箭、无人机、可穿戴技术、机器人技术、可植入技术、超硅计算与通信技术的快速发展与应用，为业务创新奠定了坚实的技术基础。应用与技术的双重创新驱动，决定 5G 应用将在未来 10 年快速成长，并创造

出新的生活方式、数字经济和社会结构，例如跨阶层的数字生活、网红经济、数字贵族等。

为顺应人性化、全息交互、群体协作的业务发展趋势，6G 时代可能诞生的全新服务将进一步扩展到感知互联网、AI 服务互联网与行业服务互联网，呈现出万务智联改变世界的 6G 愿景，详见图 2。

### 4 6G 业务需求初步分析

#### 4.1 感知互联网

感知互联网是指视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉、情感与意念等全息协作实时交互媒体互联服务。

感知互联网的典型用例“如影随形实时共享感知”是指在预定的持续时间内，经过许可与信任控制，一个人可以通过自己的视觉和或其他感觉，真实地体验另一个人的感觉甚至生活。例如，一位母亲可以真实地体验孩子刚刚穿上新鞋后是否磨脚的个人感受。

### 4.2 AI 服务互联网

AI 服务互联网是指未来任何人、机器、组织或行为，都可以享受的协作智能互联服务。

AI 服务互联网的典型用例“高速公路无人自动驾驶”是指无人驾驶汽车或车队依据实时导航与定位机器人的最佳路线设计，机智地避免与车外人体或物体的碰撞，以最短时间、最小能耗到达目的地。

### 4.3 行业服务互联网

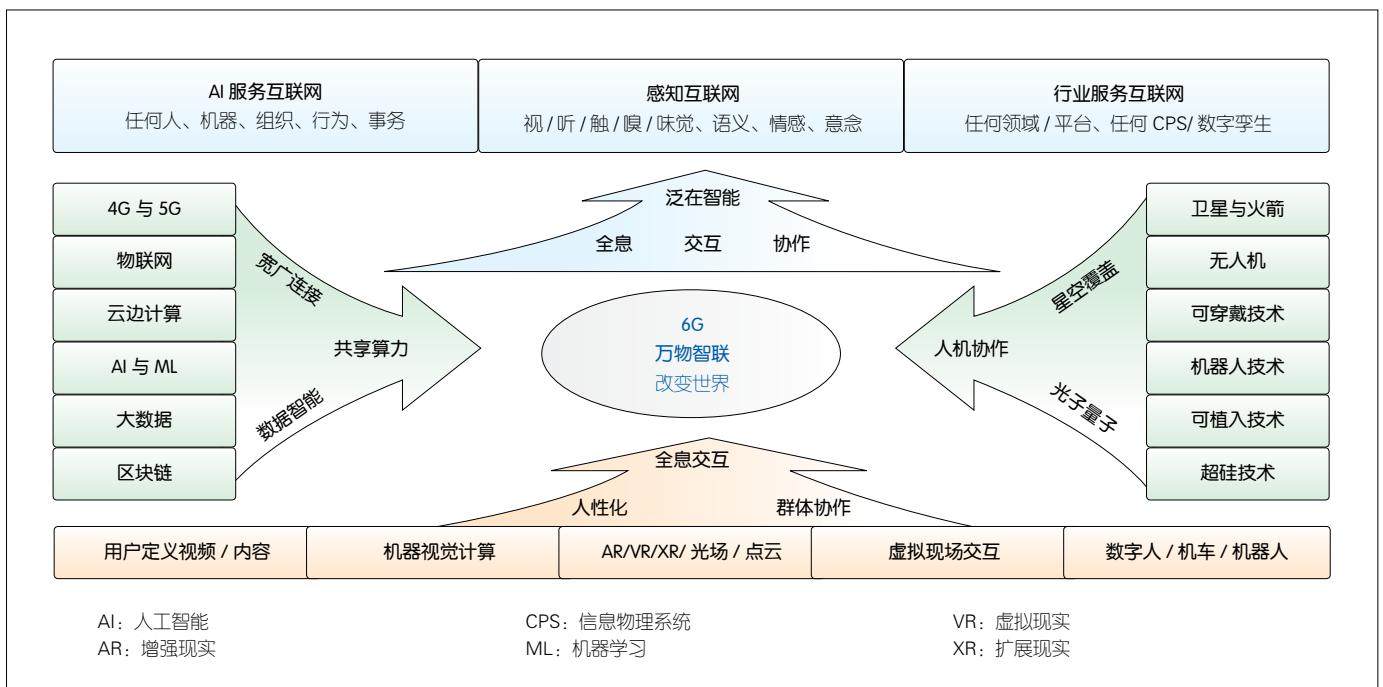
行业服务互联网是指跨越任何领域或平台、任何网络物理系统（CPS）或数字孪生服务所需的协作或虚拟孪生感应与执行互联服务。

行业服务互联网的典型用例“触觉反馈机器人手术”是指通过人机协作并借助多路辅助视频（包括增强现实视频）和触觉反馈的方式远程完成诸如冠状动脉、腹腔镜等无创外科手术。

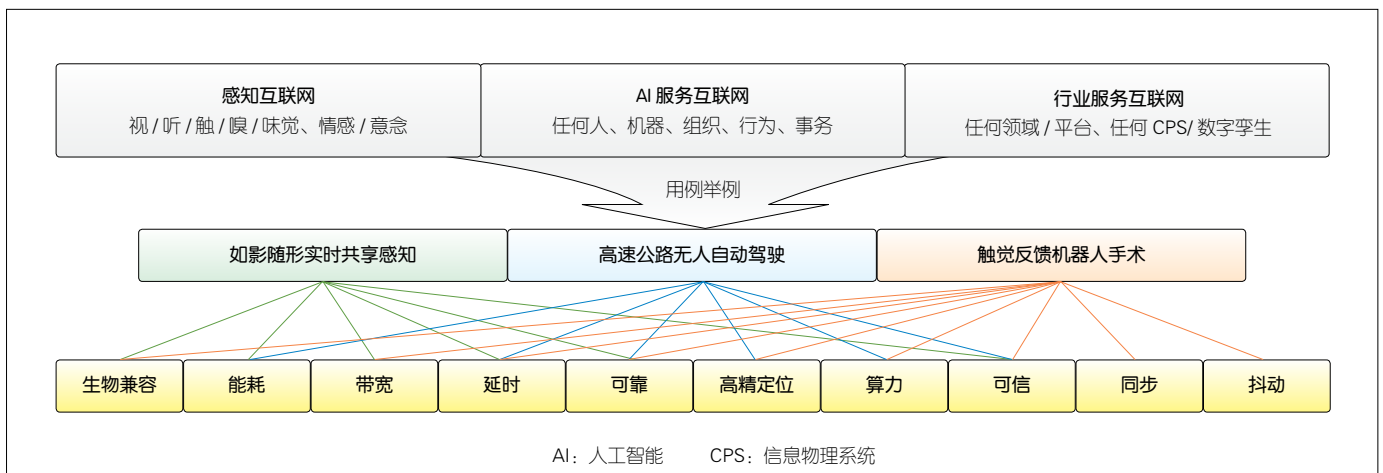
### 4.4 6G 业务需求

感知互联网侧重于感知全息实时共享，AI 服务互联网侧重于泛在智能，行业服务互联网侧重于人机或机器之间的协作自动。

图 3 列举了上述典型用例的初步连接需求，包括但不限于带宽、延时、同步、抖动、可靠性、高精定位、能耗、算力、生物兼容性等需求，每个典型用例的具体性能指标尚在研究之中。



▲图 2 6G 业务发展趋势与愿景



▲图 3 感知、AI 与行业服务互联网用例与需求

### 5 6G 网络性能指标初步预测

依据 3GPP R17 5G 新服务需求研究结果<sup>[6-13]</sup>，结合高清、高自由度、人眼极限视频带宽与可靠性要求<sup>[14-15]</sup>，以及自动驾驶定位精度要求<sup>[16]</sup>和非地面网络空中基站移动速度<sup>[17]</sup>要求等，我们可以初步估计 6G 时代新型服务的性能指标需求和相对 5G 网络性能指标的提升倍数，如图 4 所示。

6G 网络将支持 1 Tbit/s 的峰值数据率、20 Gbit/s 的用户体验数据率、10 Gbit/(s·m<sup>2</sup>) 的区域业务容量密度、100 Gbit/(s·m<sup>3</sup>) 的空间容量密度、每平方米 100 个终端的连接密度、167 dB 的最大耦合损耗(表示极限覆盖范围)、8 km/s 基站或小区移动速度、低于 0.5 ms 用户面时延、高于 7 个 9 的可靠性、20 年的电池供电寿命、0.2 μs 的确定性通信时延同步精度、低于 10 cm 高精度定位精度。相对而言 5G 网络支持 20 Gbit/s 的峰值数据率、100 Mbit/s 的用户体验数据率、10 Mbit/(s·m<sup>2</sup>) 的区域业务容量密度、每平方米 1 个终端的连接密度、164 dB 的最大耦合损耗(表示极限覆盖范围)、

500 km/h 的移动速度、0.5 ms 的 eMBB 用户面(UP)单向时延、5 个 9 的可靠性、10 年的电池供电寿命、1μs 的确定性通信时间同步精度、10 m 以上定位精度。6G 相对 5G 网络的性能指标提升倍数，详见图 4。当然，随着 5G 服务用例的不断扩展，5G 长期演进网络也可以有步骤地达到这些网络性能指标要求。

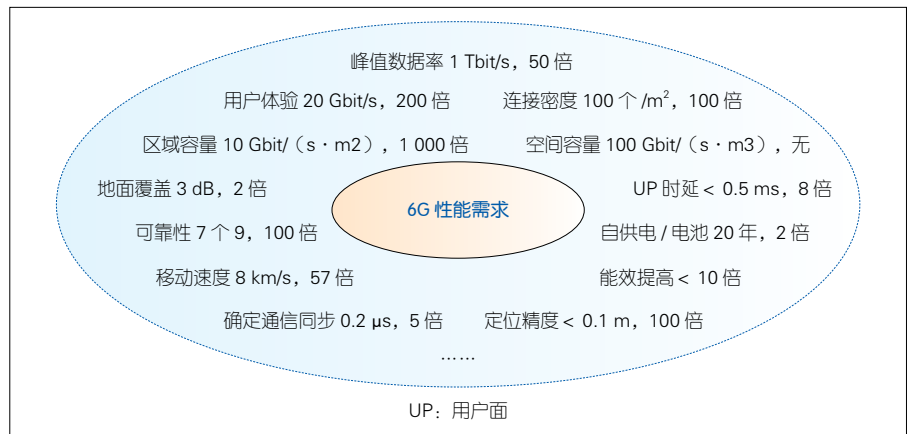
B5G/6G 技术研究结果，6G 网络使能技术可以从图 5 所示的结构、链路、空域、流域、推理、计算这 6 个维度来考虑，具体包括自治自动网络、智能三维连接、智能大规模天线阵、按需网络拓扑、按需网络计算、超硅计算与通信。

### 6.1 自治自动网络架构

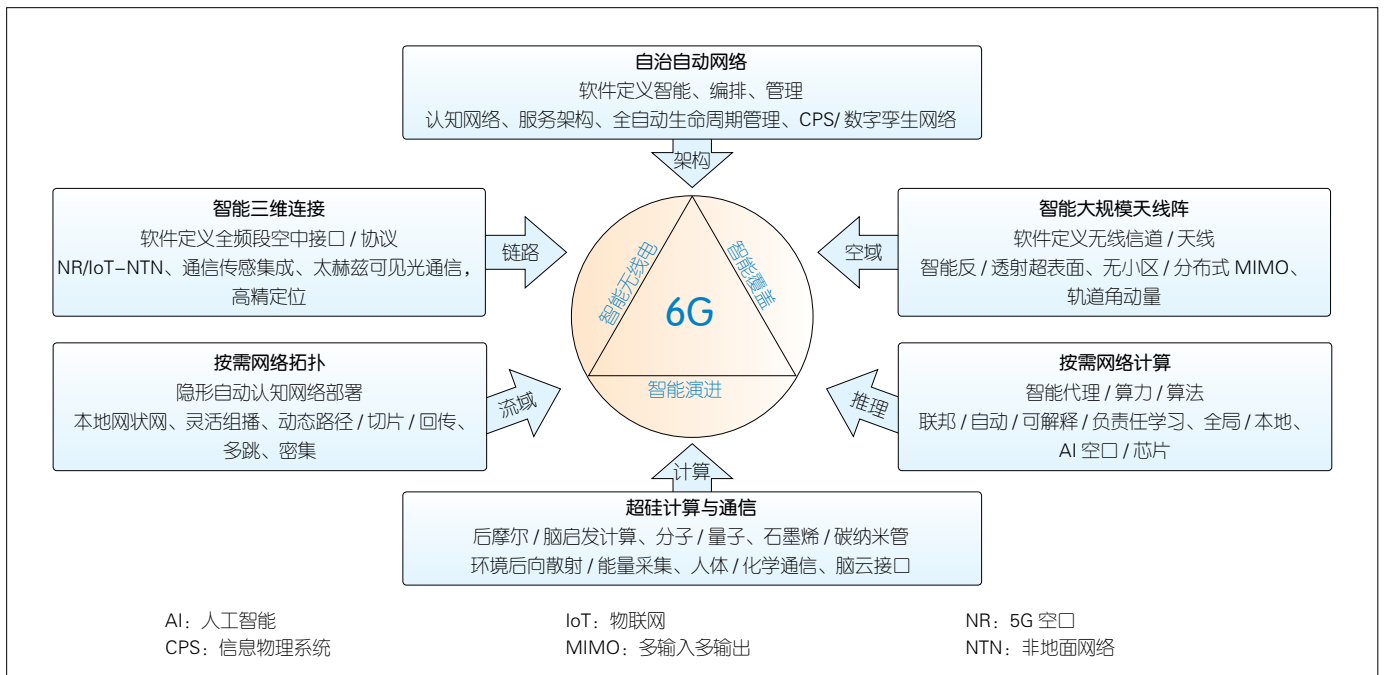
6G 网络不仅需要支持智能化、自动化、服务化的系统网络架构，实现软件定义智能、编排与管理(例如如

### 6 6G 网络潜在使能技术

面向上述 6G 及 5G 长期演进网络服务与性能需求，参考全球产学研



▲图 4 6G 网络性能指标要求及其相对 5G 的提升倍数



▲图 5 6G 网络技术体系框架

知网络、服务架构、全自动生命周期管理、CPS 与数字孪生网络），同时还支持智能无线电、智能覆盖与智能演进的无线网络架构<sup>[18]</sup>，以确保服务、编排、管理、拓扑、部署、覆盖、空口、天线等连接要素的灵活性和软件可编程。

所谓智能无线电是指软件定义的无线信道，通过无线链路与其传播特性的分离，实现有线通信质量或超过有线通信质量的无线连接；智能覆盖是指终端与小区分离，虚拟小区为终端服务，小区边缘不再存在；智能演进是指独立的无线网络功能演进，任何动态操作可支持 AI 处理，网络拓扑可依据服务需求灵活选择与改变。因此，6G 自治自动网络架构将成为各项 6G 网络使能技术的融合基础。

## 6.2 智能三维连接

智能三维连接是指空、天、地、海一体化全频段智能通信连接，支持人与人通信、人机合作通信与机器通信，支持兆赫兹到太赫兹频率范围，支持 2G/3G/4G/5G 等地面网络（TN）与非地面网络（NTN）融合组网——这里 NTN 是指地上/水下无人机、半静止空中平台、飞行器、低/中/高/同步地球轨道卫星等组成的非地面通信网络。

智能三维连接主要技术挑战包括全频段频谱管理（包括 NR/IoT-NTN 空口演进、通信与传感集成、太赫兹与可见光通信、厘米级高精定位等多制式空口设计）、多制式和谐物理层共存设计、远距离随机接入与时频偏移补偿技术、高谱效大连接多址技术、无线资源与干扰管理、高速移动性管理、业务与终端服务连续性，确定性及其通信技术，以及满足一个或一组特定业务需求（如谱效、能效、成本效率、可靠性、时延与抖动）的智能

连接策略。其中，太赫兹通信技术挑战包括：极低峰均功率比波形与调制，超大带宽与容量信道编码，极窄波束管理技术，漫散射信道建模技术，极低功耗 RF 器件，高增益天线技术，大带宽数模与模数转换技术，全电与光电混合链路设计等。可见光通信技术挑战包括：可见光超辐射发光二极管等光信号源设计，大带宽与高灵敏度光检测器，外调制器、放大器、复用与解复用、光开关与收发集成器等光电混合器件，室内/室外/水下光信道建模以及阵列天线技术。

## 6.3 智能大规模天线阵

智能大规模天线阵是指依据空间自由度达到三维连接链路优设计要求的智能天线阵技术，包括能量有效的大容量多用户多输入多输出（MU-MIMO）、超大规模天线阵列智能波束管理技术、以终端为中心的分布式 MIMO 技术、灵活部署的智能反射/透射表面技术等。

智能大规模天线阵主要应用场景包括城市密集街区高频覆盖、大容量 MU-MIMO 能效改进、室外到室内连续覆盖、高频段高速移动无损切换、人造无线信道环境。

智能大规模天线阵主要技术挑战包括空间效率与链路性能联合优化、高增益低损耗智能天线面板设计、网络级多天线灵活部署策略、智能 MIMO 算法设计、智能导频与训练序列优化设计等。

## 6.4 按需网络拓扑

按需网络拓扑是指依据服务和连接需求灵活选择或改变网络部署形态与密度，以实现成本、能耗等性能指标的按需优化，包括 TN/NTN 接入与回传集成、本地网状网、灵活组播与多跳技术、动态路径选择、动态网络

切片、多层异构密集化技术等。

按需网络拓扑主要应用场景包括跨行业（如卫星广播电视与通信）数字基础设施综合服务平台、本地部署的 CPS 或数字孪生等确定性传感通信（如数字孪生城市基础设施监控、协作机器人通信）服务平台。

按需网络拓扑主要技术挑战包括数据/意图驱动智能拓扑（包括网状网、组播、多跳）策略、灵活无线接入网或虚拟小区（即用户为中心的服务小区）、智能移动网络（包括用户或站点移动性预测与切换）、智能端到端网络切片（包括业务与用户资源需求预测与分配）等。

## 6.5 按需网络计算

按需网络计算是指 6G 网络智能代理、算力与算法技术，包括神经网络、增强学习、迁移学习、对抗学习、联邦学习、自动学习、可解释学习、负责任学习等深度学习算法以及全局与本地 AI 分层技术和 AI 空口设计与 AI 芯片技术，以确保服务、资源、管理尤其是算力效率及其可信性。

按需网络拓扑应用场景包括物理层自动调制解调与信道编译码、无线高精定位、移动性管理、网络灵活部署、网络服务编排与管理等。

按需网络拓扑主要技术挑战为云边端混合联邦 AI 架构、网络全局与本地 AI 集成、多个 AI 代理目标对准、可解释 AI 算法设计、标签数据自助获取、数据标签的主动学习、训练与测试误差降低。

## 6.6 超硅计算与通信

超硅计算与通信是指各种后摩尔计算或人脑启发计算技术<sup>[19]</sup>，包括计算存储技术、神经形态计算、量子计算等新型计算，基于石墨烯与碳纳米管等新型二维/三维材料的计算技术，三维

异质集成、多芯片结构与高速互联技术，以及环境无线能量采集技术、极近距离人体无线通信或液态分子通信、人体大脑与计算机或云接口技术等。

当然，这些新型计算技术的可行研究可能需要在 6G 演进网络框架中被考虑，例如以分子通信<sup>[20]</sup>（液体或其喷雾的化学通信）和脑云接口<sup>[21]</sup>（神经元细胞突触与超级大脑云之间的接口）为代表的微观三维连接技术。

## 7 中兴通讯 6G 创新技术实例

如何设计满足上述 6G 服务需求的 6G 网络结构与使能技术，并通过测试、试验验证其技术可行性，将是中国与全球 6G 产学研资源的共同使命。中兴通讯无线技术研究团队围绕上述 6G 使能技术开展了相应关键技术研究与创新工作，例如服务架构无线网络（SBA-RAN）、平滑虚拟小区技术（SVC）、智能反射表面 MIMO 技术（IRS-MIMO）与增强多用户共享接入（eMUSA）。这些创新技术实例不仅可以用于 6G 网络设计，还可以用于 5G 演进网络的需求与功能扩展及其性能提升。

### 7.1 SBA-RAN

为支持云原生的 6G 网络，有必要在无线接入网侧引入与核心网有效融合的服务架构网络——云原生的 6G 网络包括智能三维连接所需的原生的软件定义全频段空中接口和协议栈、需求，和意图驱动的多制式空口及不同物理层技术的灵活演进。服务架构无线网络一般设计原则包括：

- 1) 最小化耦合关系的模块化、服务化功能定义和功能划分；
- 2) 最大化流程重用，流程本身也是服务；
- 3) 控制功能和执行功能分离，以允许独立的实现、部署、弹性伸缩

和定制；

4) 解耦框架性功能（或平台性功能）与其上的无线服务功能；

5) 支持按需的“无状态”控制功能，其中“无状态”是指上下文的使用和存储是分离的。

无线接入网服务功能不仅包括物理层执行功能、物理层控制功能、用户面执行功能、用户面控制功能和无线连接控制功能，还包括和这些基础功能相关的数据存储功能、数据采集功能、智能分析功能和运营功能。无线服务功能可进一步划分为执行平面、控制平面、数据平面、智能平面、运营平面。跨平面的多功能协作可支持像无线接入网切片之类的高级特性。若大量的租户需要共享无线接入网基础设施，则执行功能和控制功能可以被运营平面、智能平面的功能所编排和配置，以满足不同租户的个性化需求。

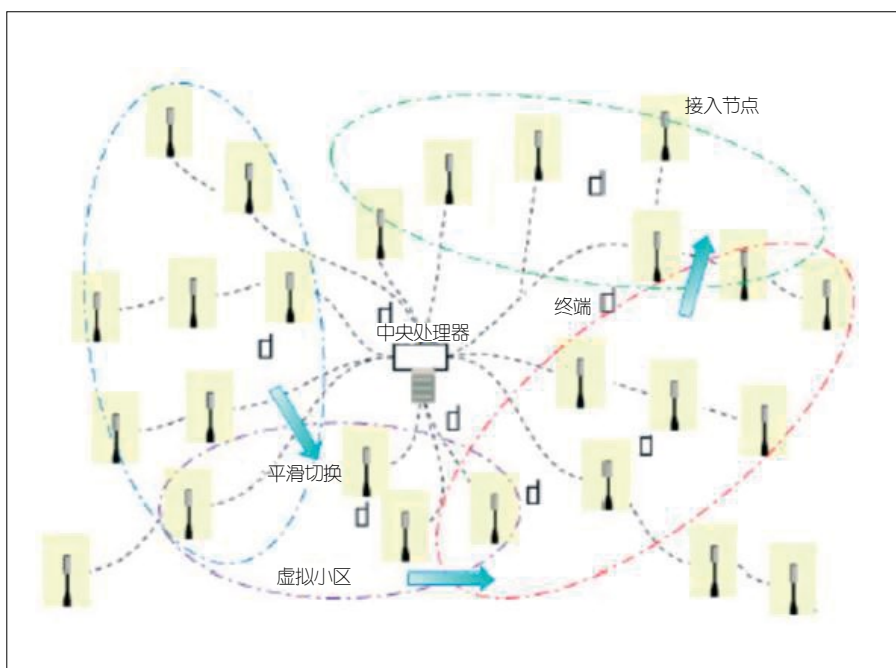
SBA-RAN 可以支持无线接入网不同功能的独立演进，它是原生的软件定义空中接口（SDAI）/协议（SDP）的使能技术。

### 7.2 SVC

SVC 通过部署大规模分布式接入节点（AP），利用本地化共轭预编码技术实现 AP 间相干上下行传输，以用户为中心的灵活虚拟小区构建，支持几乎一致的用户传输质量而不管它们处于哪个位置，来实现可以消除传统蜂窝小区边界的平滑切换技术，旨在解决小区间干扰问题并提升用户体验。

如图 6 所示，每个 AP 配备有少量天线，分布在所需覆盖区域内，通过前端前传网络协同工作，与一个或多个中央处理器（CPU）相连。在理想情况下，平滑虚拟小区以时分双工模式运行，其上行链路导频信号可用于上行和下行链路信道估计。

每个用户享有由大量较佳质量的 AP 构造出的虚拟小区服务，路径损耗较小且多个信道相互独立，可以实现大规模衰落分集，从而解决了常规共址天线基站的小区边缘干扰问题。虚拟小区包含的 AP 规模越大，SVC 网络中的虚拟小区干扰会更容易被抑制。与此同时，信道硬化的效果使得整个



▲ 图 6 平滑虚拟小区概念框图

系统的设计得到有效简化。

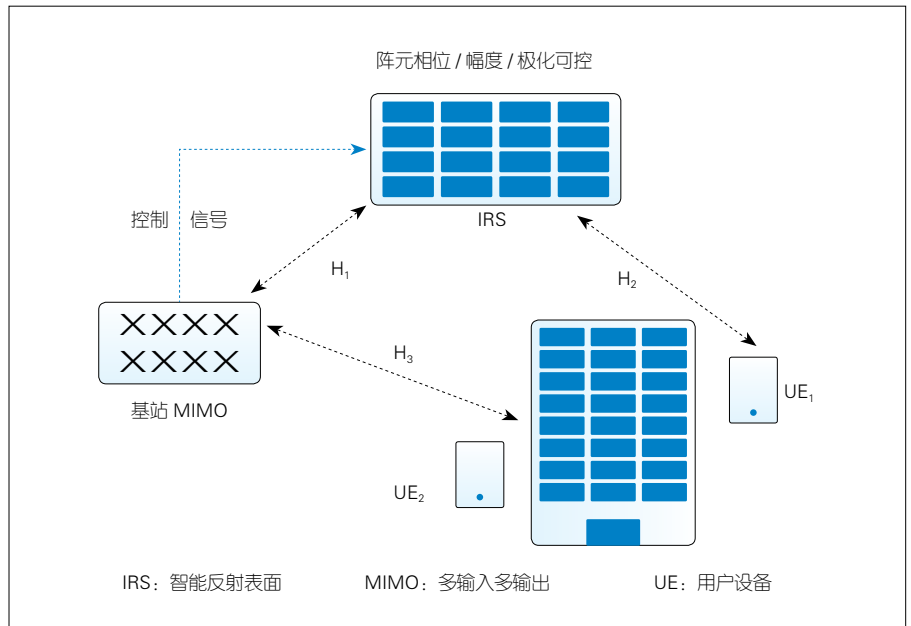
CPU 主要负责编码调制以及资源的调度分配等功能。下行信息发送时，在 AP 处执行信号共轭预编码来避免大量信道状态信息 (CSI) 的交换；上行信息接收时，AP 使用本地 CSI 实现预编码匹配滤波器、迫零或最小均方误差等信号检测处理。每个接入点由天线和用户设备级射频模块组成，这些模块执行数字操作，例如信道估计、组合 / 预编码、插值 / 抽取、数字预失真和离散傅里叶变换；因此这对前端网络传输容量提出更高要求。

SVC 主要应用场景包括高频段超大带宽通信、一致用户体验、低时延超高可靠通信、用户附近内容缓存、网络密集型计算任务。SVC 关键技术挑战包括前端前传带宽降低、无小区初始接入、免调度随机接入技术等。

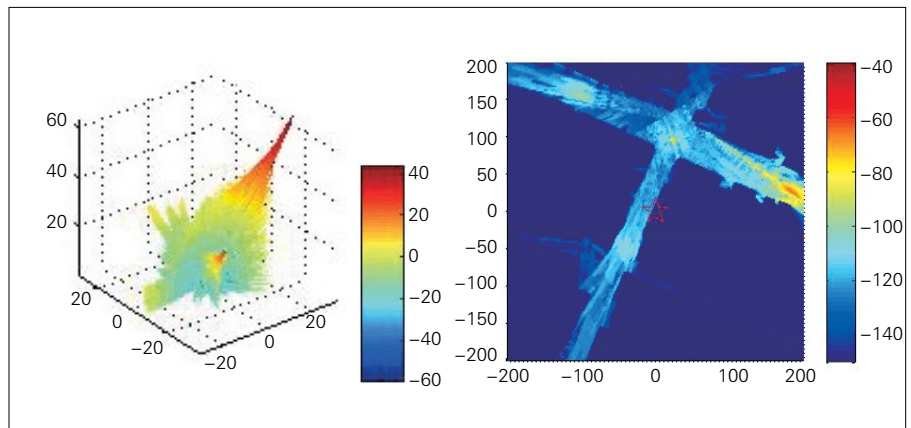
### 7.3 IRS-MIMO

IRS-MIMO 主要应用场景包括高频覆盖与服务连续性改进、MIMO 容量和能效性能改进、人造无线信道环境。图 7 给出 IRS-MIMO 系统组成框图，该系统由 MIMO 基站、基站可控的智能反射表面天线板、用户终端组成。基站可以通过无线或有线控制信令接口，按需控制智能反射表面天线板辐射信号相位 / 幅度 / 极化等配置参数。处于基站非视距传播位置且无法接收到基站的直射信号的用户终端 (UE1)，可以通过 IRS-MIMO 天线板接收基站 MIMO 发射信号。

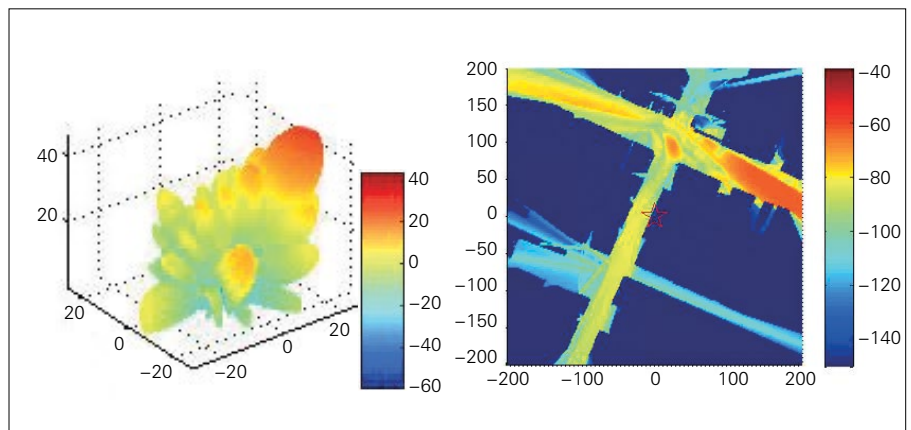
图 8 与图 9 分别给出了高频段 (28 GHz) 与低频段 (2.6 GHz) 上城市密集街区楼顶 IRS-MIMO 天线板主波束对准某一方位时的辐射方向图，同时给出了 IRS-MIMO 天线板通过反射基站 MIMO 信号在原基站非直射区域的接收信号强度仿真结果。结果显示，该基站原来的覆盖盲区街道上目



▲ 图 7 IRS-MIMO 系统室外覆盖扩展



▲ 图 8 28 GHz 频段智能反射表面 (IRS) 面板立体方向图 (单位: dBi) 与 IRS 对基站信号的反射信号强度分布 (单位: dBm)



▲ 图 9 2.6 GHz 频段智能反射表面 (IRS) 面板三维方向图 (单位: dBi) 与 IRS 对基站信号的反射信号强度分布 (单位: dBm)



标覆盖区域的信号得到了增强，从而扩展了基站 MIMO 的覆盖。需要被进一步研究的 IRS-MIMO 技术问题包括：IRS-MIMO 信道建模；IRS 天线板的面板配置参数设计，及其对 MU-MIMO 能效、容量或谱效影响的定量评估；基站与反射信号联合优化的 MU-MIMO 算法优化设计等等。

#### 7.4 eMUSA

随着未来通信技术从人的通信转变为物的通信、下行为主转变为上行为主、基站为中心转变为去中心化，传统的接入技术将无法处理海量连接和实时传输的需求；因此，eMUSA 技术<sup>[22]</sup>应运而生。eMUSA 是一种轻量级和即时的多用户传输技术。图 10 给出了 eMUSA 技术愿景、特性与技术实现。

eMUSA 可以应用在海量机器类通信 (mMTC) 场景，简化传输交互流程，

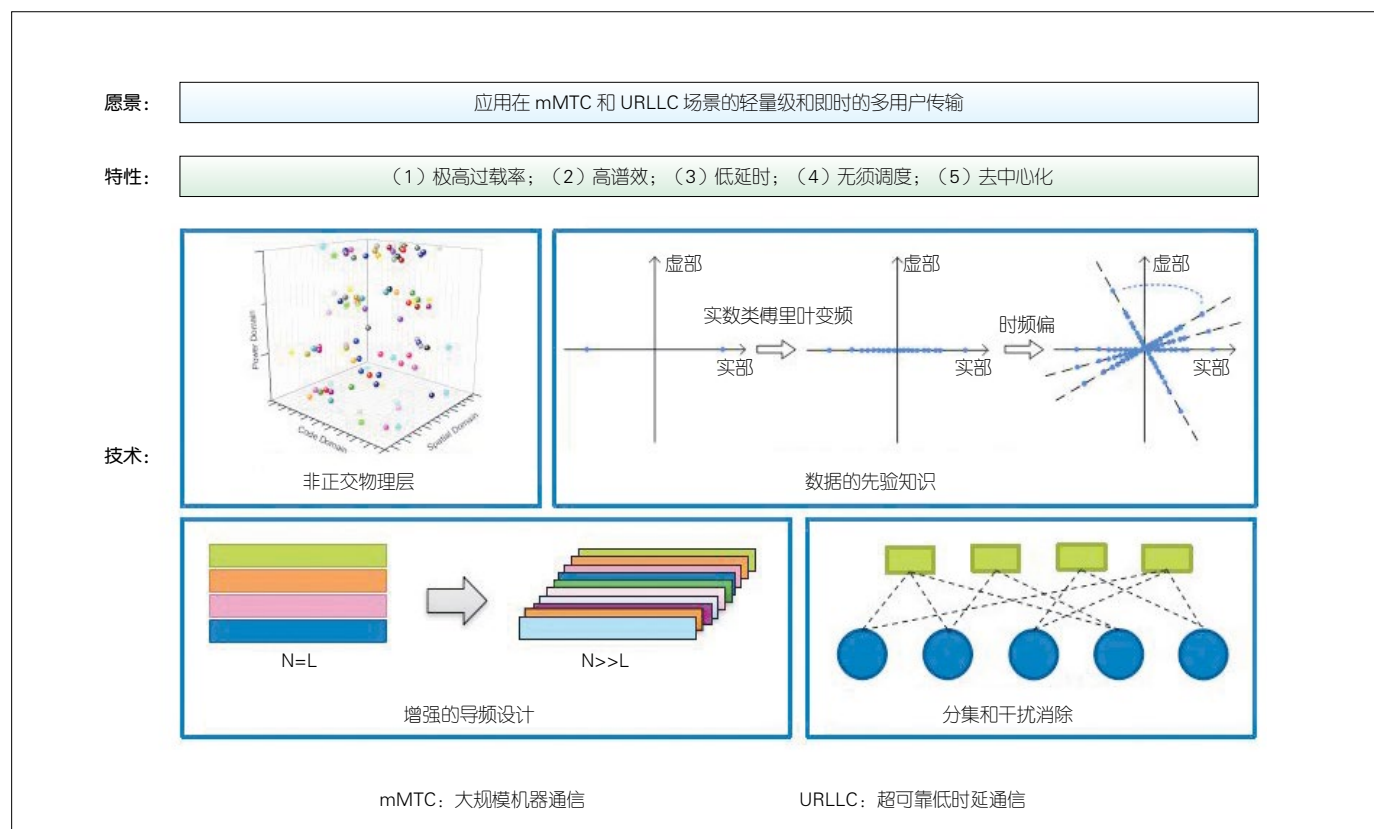
省去海量用户调度的巨大开销，从而实现高过载和高谱效的小包传输和低成本终端设计。eMUSA 也可以应用在超可靠低时延通信 (URLLC) 场景，减少调度造成的延时，并且可以支持无设施的端到端传输，以保障传输的稳健性。另外，eMUSA 无需中心节点的调度，就可以满足未来以用户为中心的 6G 网络架构要求。

在免调度的场景，多用户传输无法保证严格正交，eMUSA 采用基于功率域、码域和空域的非正交技术来区分不同的用户。为了避免导频碰撞，eMUSA 支持无须导频的纯数据传输。eMUSA 利用数据的先验知识进行用户检测、均衡、时频偏估计等信号处理，并且针对物联网采用创新的波形设计来支持低峰均比 (PAPR)。当接收天线数很多时，基于数据的方案对于空域合并比的搜索空间太大、复杂度

高。在这种场景下，eMUSA 采用增强的导频设计来减小导频碰撞。和传统的非正交导频不同，eMUSA 采用部分正交的导频设计以减小接收端的复杂度，降低邻小区干扰和抵抗时频偏。另外，由于接入的用户数是完全随机的，eMUSA 可以借助分集和干扰消除技术来平均不同时刻上的用户干扰，以获得更加可靠的性能。

## 8 总结与展望

终端与应用创新始终是移动网络“跳跃式”发展的动力，例如智能手机、社交网络与用户短视频；而受限光波处理算法与终端算力，增强现实/虚拟现实 (VR)/XR 终端尚未“再现”智能手机的成功。未来新型服务终端、超硅与非冯·诺依曼计算、5G 竞争技术的比较创新，将在很大程度上决定 6G 需求、架构与技术创新的性质是“演



▲图 10 增强多用户共享接入愿景、特性及技术实现

进”还是“革命”。其中，超硅计算既是 6G 最大挑战，也是 6G 潜在机会；石墨烯与碳纳米管等新型材料科学、神经生态计算、量子计算、人脑科学等基础研究，将帮助 6G 发现并使用维持摩尔定律高速发展的计算技术。

当然，网络侧技术创新的目标始终是：更高的频段和或带宽，更高的频谱、空间、接入、能量、成本、冗余、链路、拓扑、密集部署、管理与编排、计算效率。6G 自治自动网络架构、智能三维连接、智能大规模天线阵、按需网络拓扑、按需网络计算是实现上述网络侧技术创新目标的潜在候选技术。其中，空地通信融合组网、平滑虚拟小区、智能反/透射表面 MIMO 技术、大约 1 ~ 10 GHz 带宽的太赫兹通信、通信传感集成技术、增强多用户共享接入等 Pre6G 技术将可能率先在 5G 演进网络中得到应用。

面向 2020—2023 年 B5G 与 6G 研究窗口，中兴通讯将立足 2G、3G、4G 与 5G 大规模商用网络的连接技术积累，与全球 6G 产学研创新生态系统互相合作，为 5G 向 6G 网络的长期演进贡献更多更强的 Pre6G 创新技术。6G 商用虽然遥远，但是 Pre6G 技术正在向我们走来！

## 致谢

本文第 7 章的主要贡献人包括中兴通讯股份有限公司无线经营部陈艺骞、马一华、窦建武、谢峰、袁志峰与彭琳，在此表示特别感谢！同时，郁光辉、向际鹰博士在本文起草中提出指导意见，在此一并感谢！

## 参考文献

- [1] ITU. Workplan for a preliminary draft new report ITU-R M. [IMT. FUTURE TECHNOLOGY TRENDS][R]. ITU-R WP5D#34 Meeting Document 5D/TEMP/96, 2020

- [2] ITU. ITU-R working party 5D structure and workplan[R]. ITU-R WP5D#34, R19-WP5D-C-0134/H02/MSW-E, 2020
- [3] 钟义信. 智能是怎样生成的[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(2):47-51. DOI: 10.12142/ZTETJ.201902010
- [4] 张嗣宏, 左罗. 基于人工智能的网络智能化发展探讨[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(2):57-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.201902009
- [5] WANG Z D. Editorial: special topic on machine learning for wireless networks[J]. ZTE communications, 2019, 17(2): 1-1. DOI: 10.12142/ZTECOM.201902001
- [6] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: R14 TR 38.913[S]. 2016
- [7] 3GPP. Service requirements for the 5G system: R15/16/17 TS 22.261[S]. 2017
- [8] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains: R16 TR 22.104[S]. 2019
- [9] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains (CAV): R16 TR 22.804[S]. 2018
- [10] 3GPP. Study on communication services for critical medical applications: R17 TR 22.826[S]. 2019
- [11] 3GPP. Study on audio-visual service production: R17 TR 22.827[S]. 2019
- [12] 3GPP. Study on enhancements for cyber-physical control applications in vertical domains: R17 TR 22.832[S]. 2019
- [13] 3GPP. Study on network controlled interactive service (NCIS) in the 5G System (5GS): R17 TR 22.842. 2019
- [14] Qualcomm. VR and AR pushing connectivity limits [EB/OL]. (2017-03-29)[2020-06-16]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/vr-and-ar-pushing-connectivity-limits>
- [15] BASTUG E, BENNIS M, MEDARD M, et al. Toward interconnected virtual reality: opportunities, challenges, and enablers[J]. IEEE communications magazine, 2017, 55(6): 110-117. DOI:10.1109/mcom.2017.1601089
- [16] REID T G R, HOUTS S E, CAMMARATA R, et al. Localization requirements for autonomous vehicles[J]. Robotics, 2019, 2(3). DOI: 10.4271/12-02-03-0012
- [17] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): R16 TR 28.821[S]. 2020
- [18] FANG M. Service native challenges and innovations towards 6G[C]//Keynote presentation in the 2nd 6G Wireless Summit: Finland, March 17-18, 2020. [http://www.6gsummit.com/keynotes/keynote6\\_public/](http://www.6gsummit.com/keynotes/keynote6_public/)
- [19] BAUSU S, BRYANT R E, MICHELI G D, et al. Nonsilicon, non-von neumann computing—Part I [Scanning the Issue][J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(1):11-18. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2884780
- [20] KUSCU M, DINC E, BILGIN B A, et al. Transmitter and receiver architectures for molecular communications: a survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, (99):1-40. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2916081
- [21] MARTINS N R B, ANGELICA A, CHAKRA-VARTHY K, et al. Human brain/cloud interface[J]. Frontiers in neuroscience, 2019, 13.

DOI: 10.3389/fnins.2019.00112

- [22] YUAN Z, LI W, LI Z, et al. Contention-based grant-free transmission with independent multi-pilot scheme[EB/OL]. (2020-04-07)[2020-06-16]. <https://arxiv.org/abs/2004.03225>

## 作者简介



**方敏**，中兴通讯股份有限公司无线经营部 6G 研究与合作总监、清华大学信息与通信系统专业工学博士；长期从事下一代无线通信系统关键技术研发、标准化与专利保护工作，现专门从事 6G 新服务、新频谱、新结构与新技术相关的创

新技术研究工作；曾率领中兴通讯无线标准团队全程参与并完成 3GPP R8 LTEFDD 与 EPC 标准技术规范的研究与起草工作，并对 5G 关键技术可行性研究做出突出贡献，其中 Pre5G 大规模天线阵技术获得 2016 年世界移动大会双项技术大奖；参与发表 1 部 5G 专著并获多项发明专利。



**段向阳**，中兴通讯股份有限公司无线架构总经理、国家重大专项专家组成员、未来移动通信论坛副理事长；负责中兴通讯无线系统关键技术规划与创新，拥有超过 20 年的移动通信关键技术和产品研发经验；

获得中国电子学会科技进步一等奖 1 次、深圳市科技进步一等奖 2 次；发表 IEEE 专题论文 1 篇，获国家发明专利 15 项。



**胡留军**，中兴通讯股份有限公司无线经营部算法部部长，工程博士；从事移动通信技术研究和管理工作 20 余年，主要研究方向包括系统功率控制、编码调制技术、物理层处理流程设计、超密集组网技术以及网络规划与优化等；主持

了 TD-LTE-Advanced 技术标准研发与验证、5G 热点大容量组网技术与试验系统研发等多项国家级重大项目，曾获得广东省专利金奖、广东省科学技术奖二等奖等；发表论文和专利共百余篇。



# 5G 赋能 B 端，助力行业转型

## 5G Enables the Industry and Helps Industry Transformation

左罗 /ZUO Luo  
陈亚斌 CHEN Yabin

(中兴通讯股份有限公司，广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

**摘要：**运营商面临客户（C）端市场增长乏力问题，更多地将来增长希望寄托于商业（B）端市场。面对困境，运营商唯有全方位变革方能破局。指出 5G 撬动 B 端行业变革的关键能力要素有 4 个：核心竞争能力、规模复制能力、灵活变现能力和组织支撑能力。以网络核心能力为核心构建完整的 5G 核心能力体系方能从容不迫地应对 B 端经营新模式的挑战。认为核心能力体系的构建除了需要网络核心能力之外，还需要进一步构建行业核心能力、通用方案、行业商城，同时组织能力的匹配也是运营商能否成功开拓 ToB 市场的关键。唯有体系化的支撑才能进一步地促进 5G 与行业结合的健康发展。

**关键词：**5G 网络；能力开放；核心能力；垂直行业

**Abstract:** Facing the lack of growth in the personal market, operators are expecting more growth in the industry market, and only through all-round reform can the dilemma be addressed. The key capabilities of 5G leveraging industry transformation include four factors: core competitiveness, large-scale replication, flexible liquidity, and organizational support. Building a complete 5G core capability system with core network capabilities as the key can meet the challenges of new operation models in the industry. In addition to core network capabilities, the core industry capabilities, general solutions, and industrial shopping malls need to be further built in the core capability system. The matching of organizational capabilities is also the key to the success of operators in the industry market's development. Only systematic support can further promote the healthy development of 5G and industry integration.

**Keywords:** 5G network; capability openness; core capability; virtual industry

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003013

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.1754.010.html>

网络出版日期: 2020-06-23  
收稿日期: 2020-04-15

### 1 流量经营见顶，运营商实现可持续发展需要切入 B 端行业市场

随着新冠疫情在中国趋于稳定，三大运营商纷纷开启 5G 规模建设的新阶段，又掀起了以 5G 为代表的新基建热潮。在迫切的 5G 基建背后，我们可以看到运营商经营的压力与动力。前段时间中国三大运营商都发布了 2019 年的财报，通过财报数据我们可以看到运营商的整体经营状况有喜有忧，但整体情况并不乐观。主营通信业务收入呈下降趋势，新业务部分有增长；但新业务的贡献在整体收入中

占比仍然较小。总体而言，当前运营商呈现 C 端增长乏力，而 B 端业务还不足以扛起大任的局面。

在这样的大背景之下，运营商未来的经营状况堪忧。要保持整体收入水平以及可持续发展急需增加新的收入来源。B 端行业市场正好匹配了运营商的发展需求，而 5G 正是运营商开启 B 端行业市场的黄金钥匙；所以我们才看到运营商规模建设 5G 网络的波澜壮阔景象。

5G 设计之初就包含了增强移动宽带（eMBB）、海量机器类通信（mMTC）、超可靠低时延通信（URLLC）3 大场

景，以支持超大带宽、超多连接、超低时延等多种增强特性。这些特性不只是面向个人用户，同时包含了 B 端行业用户的场景需求，所以 5G 就系统而言具备了面向 B 端行业的能力。但 5G 与行业的结合并带来红利增长并不是一蹴而就的，需要一定的时间培育发展。因为受到 5G 网络的覆盖建设、行业培育、技术成熟、相关生态链等诸多因素影响，所以可能要到 2022 年 5G 与行业的结合才能给运营商带来实质性的收入。对于 5G 与行业结合所能带来的增长，全球移动通信系统联盟（GSMA）预测：从 2022 年开始 5G

将拉动运营商复合增长率提升 4 倍以上，一直持续到 2026 年并将在这一年给运营商带来 6 190 亿美元的收入。结合中国的情况看，2026 年运营商来自 B 端的收入有望与 C 端持平！

正因为 B 端行业市场的巨大发展潜力，不仅运营商寄予了厚望，OTT(指互联网公司越过运营商)企业也同样投入大量资源进行开拓。运营商和 OTT 企业在面向 B 端的经营上存在异同。相同点是目标行业是重叠的，目标客户大部分一致。运营商从连接服务逐步拓展到数字化 ICT 技术(D-ICT)融合服务，OTT 企业从 IT 服务逐步拓展到 D-ICT 融合服务。不同点有如下几个方面。行业发展方向不同：运营商支持传统行业的数字化升级，OTT 企业则是从新兴行业反向向传统行业渗透。拓展路径不同：运营商以连接为基础向综合智能服务渗透，OTT 企业以云业务为基础向综合智能服务渗透。所提供的技术与服务不同：运营商主要提供以 4G/5G、网络切片、移动边缘计算(MEC)等管道类技术为

基础的管道类大连接保障服务，OTT 则在金融支付、海量数据处理、AI 等 IT 类技术上提供云、数据、IT 类服务，具体如图 1 所示。

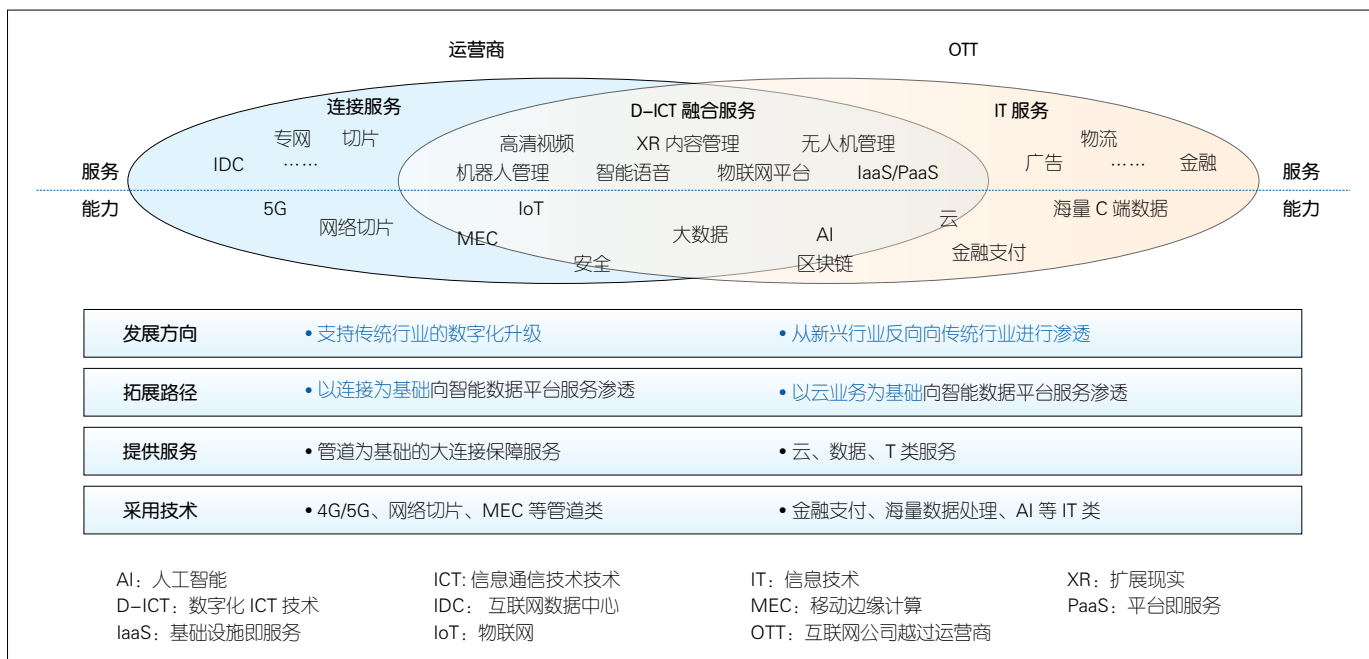
可以看出，在 B 端行业市场，运营商跟 OTT 企业是竞合关系，有同样的目标客户，但采用的行业拓展路径不同，提供的服务与技术也有差异；所以两者并不是完全竞争的关系，而是互补大于竞争。在面向 B 端的行业市场竞争中运营商要获得更大的发展，需要构建自有的核心能力，依托核心能力形成独特的竞争优势，并提升在 B 端行业市场的话语权。

## 2 铸造核心能力，服务价值行业转型的核心需求

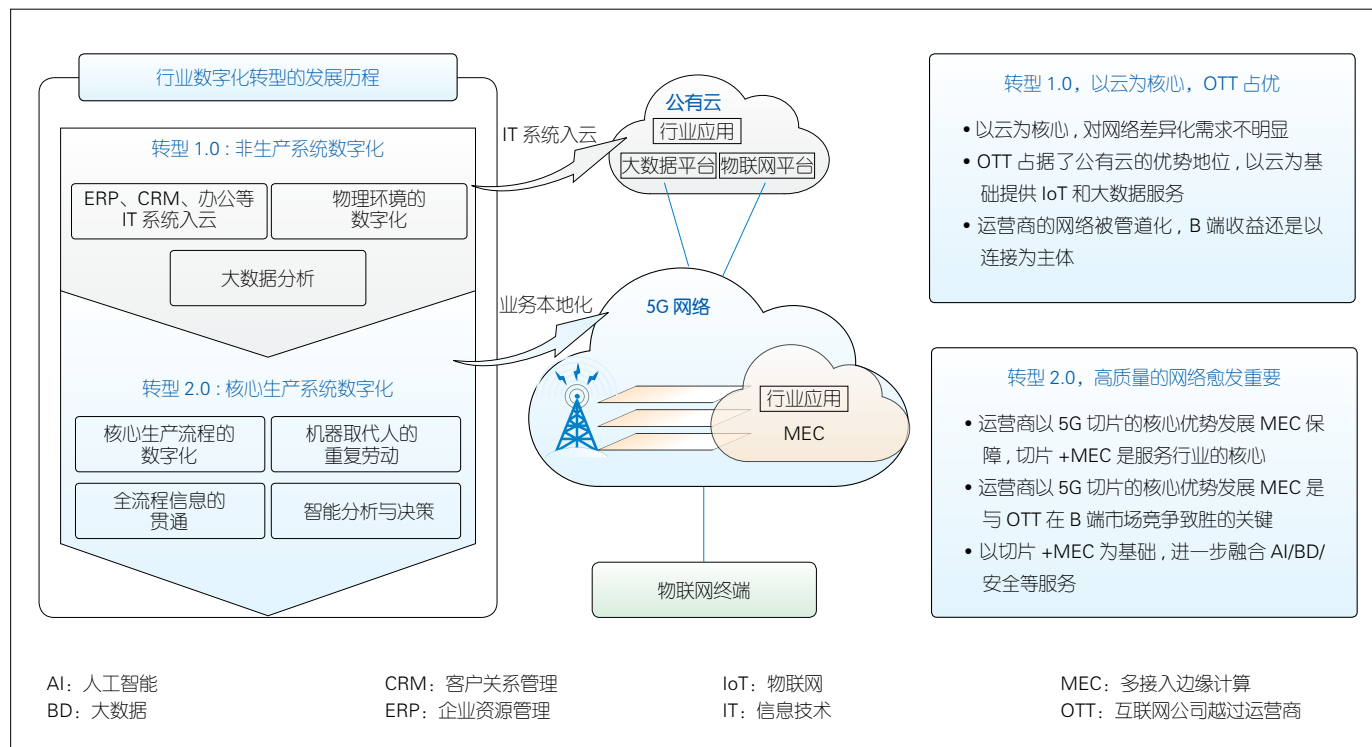
目前中国运营商为了开拓 B 端市场，都制定了相关领域的发展战略——中国移动的 5G+ 计划、中国联通的互联网化 2.0 转型、中国电信的云网融合战略等，它们都围绕运营商的基础管道能力，寻求面向 B 端的赋能和发展。三大运营商之间是同行业的竞争，

面向 B 端市场竞争时三大运营商更大的竞争对手是 OTT 企业。面对竞争，运营商要铸造面向行业的核心能力就必须深入思考 B 端行业用户的核心诉求，还要了解 B 端行业用户在行业数字化转型中不同历程的特点。

如图 2 所示，行业数字化转型分为两个阶段。第 1 阶段主要是企业办公等非生产系统的数字化，包括办公、企业管理、数据分析类的 IT 系统上云。此时，企业的需求是以集约化的云服务为核心，对网络差异化服务没有明确的需求。在这种场景下，OTT 的公有云服务占据了绝对优势地位，运营商网络被彻底管道化。在第 2 阶段，企业的生产系统入云，实现生产系统的数字化、网联化，通过数字化转型来提高生产系统的效率与安全性。生产系统与 IT 系统不同，它被要求提供低时延、大带宽为特征的高性能、高可靠以及高保障服务。这决定了生产系统的数字化不会上公有云，只有本地化的解决方案才能满足行业高标准要求。5G 网络中的切片与 MEC 能够



▲图 1 运营商与 OTT 在行业市场的经营对比



▲图 2 行业数字化转型阶段与关键诉求

满足这一需求<sup>[1-2]</sup>：切片提供高质量的连接，MEC 提供本地化的计算，两者相结合提供本地化的计算与端到端的传输保障与安全隔离，切入行业生产系统的核心诉求，如图 3 所示。

在 5G 网络服务里，在没有部署切片和 MEC 时所有的应用服务都在核心网之后的云端，业务距离用户远、时延大、带宽也不稳定。行业应用的高带宽、低时延、安全性需求驱动了业务下沉到本地，这可以通过 MEC 来实现；但是网络质量和安全性隔离还是没有得到保障，此时需要引入切片来解决这一问题。

切片实现端到端网络能力封装。切片服务是 5G 能力对外服务的主入口；MEC 是重要的信息基础设施，是电信运营商切入行业的关键节点。切片和 MEC 是 5G 网络最核心的能力，两者相辅相成，共同构成了运营商在行业市场竞争中最根本的差异化能力，成为开拓 B 端行业市场的利刃，也是

最为关键的核心能力。

运营商将切片服务与 MEC 服务协同后给行业用户提供一体化服务，可以匹配行业用户端到端的业务需求，覆盖连接和计算资源。通过切片的服务等级协议（SLA）服务以及 MEC 的边缘低时延计算提供端到端的确定性服务以及端到端的隔离服务。同时边缘计算和切片相互赋能：边缘计算将切片能力开放给业务层面并提供网络中无处不在的算力服务，网络切片为算力服务提供安全可信的保障，网络与计算协同构建出运营商端到端的云网优势。

除了切片、MEC 两个最核心的能力之外，还有其他几个能力也非常重要，包括 AI/大数据、IoT、安全、区块链等。

1) AI/大数据能力。运营商拥有天然的数据管道优势，其网络系统与业务平台详细记录了人/物在现代社会的信息指纹。客户的上网和通话行

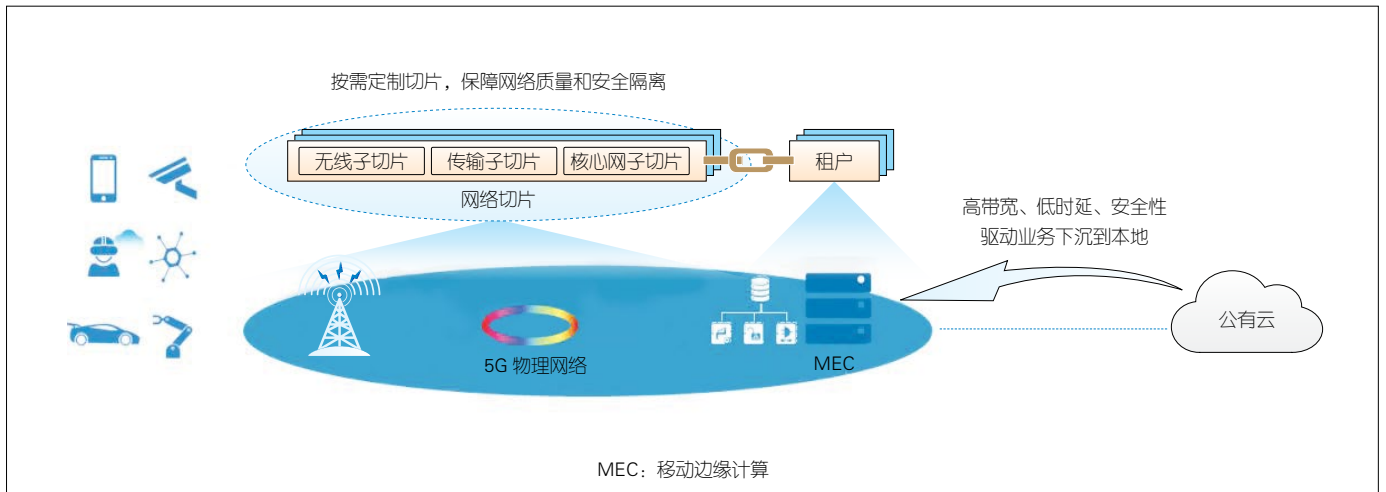
为、位置轨迹等都以比特的形式流淌在运营商管道里。运营商数据的丰富性、连续性、完整性优势明显，但因为缺乏大数据能力数据资源这些数据一直没有得到很好的应用。

构建数据能力集中化的大数据平台是大势所趋。打造集中化大数据平台，可以重点聚焦数据湖能力建设、筑湖活水、盘活全网数据这 3 个方面。

AI 能力的构建需要与大数据能力结合，同样需要建设集中式 AI 平台。聚合网络 AI 和通用 AI 等多种能力，并支持内外部的赋能以及 AI 能力开放。

2) IoT 能力。IoT 的连接管理能力是行业场景中使用最为广泛的一种能力，传统上以智慧家庭以及窄带（NB）-IoT 为主。随着 5G 深入行业，更多的 IoT 场景应用能力被激活，以满足云网协同、云边协同、数字孪生等多类需求，并主要应用在工业物联网、智慧园区等场景。

构建 IoT 能力需要以搭建 IoT 平



▲图3 切片与 MEC 协同构建行业一体化服务

台、开放接口管理协议为核心来形成云网边端的 IoT 全链条能力，需要支持定制化的组件、通用算法以及数字化流程能力。

3) 安全能力。安全一直是网络恒久不变的核心诉求。在 5G 阶段，安全诉求更是上升到新的高度。5G 新网络的云化形态、多云合一、网络能力开放、MEC 部署第三方的软件等都会带来新的不安全的因素，需要持续加强安全维度的核心能力。

安全能力分为两个层面：保障运营商网络的安全和给行业应用提供安全服务。保障网络安全的核心原则是采用统一的安全策略管控，同时增强对系统威胁的感知能力。安全能力需要被逐步增强能够做到内生安全、过程监控、防范未知、过程回溯。在行业安全服务方面主要提供一些隔离、保障、认证、防护类的增值服务。

4) 区块链能力。区块链能力可以借助技术的可溯源性以及不可修改性保证数据的安全可靠，有助于实现从“信息互联网”到“信任互联网”的转变，既可加固网络系统的安全，又能赋能行业应用的安全。构建区块链平台并通过开放接口对内外部提供服务来满足应用对区块链技术的需求。区块链

技术在网络内部可以用在云化软件管理、用户的鉴权认证、MEC 边缘能力开放等诸多安全性问题突出的领域，在行业领域则可以用来降低海量物联网终端的管理负责度和运营成本。

以上这些能力都是网络领域的核心能力，是运营商构建面向行业市场核心竞争力；但只有这些还不足以满足行业的全部需求。

行业数字化转型是更多的生产系统数字化、网联化、云化，它涉及众多的行业细分场景，也需要用到更多行业相关的能力。只有具备了转型所需的能力全集，转型的大门才会开启，这对传统行业的转型是一个挑战。如果运营商来帮助行业提供部分行业所需的能力则行业转型的门槛就会降低，同时市场规模以及自身的竞争力也将扩大，可谓收益良多。

行业核心能力是指针对不同的行业场景开发的通用核心能力，它与行业种类是强相关的。不同的行业需要不同的能力。我们常把 B 端行业的数量形容为千行万业，数量非常之多，所以运营商有限的资源和投入无法覆盖千行万业的能力需求。运营商为行业提供服务同样也是聚焦在不同行业之间能够共享的通用性能力上，

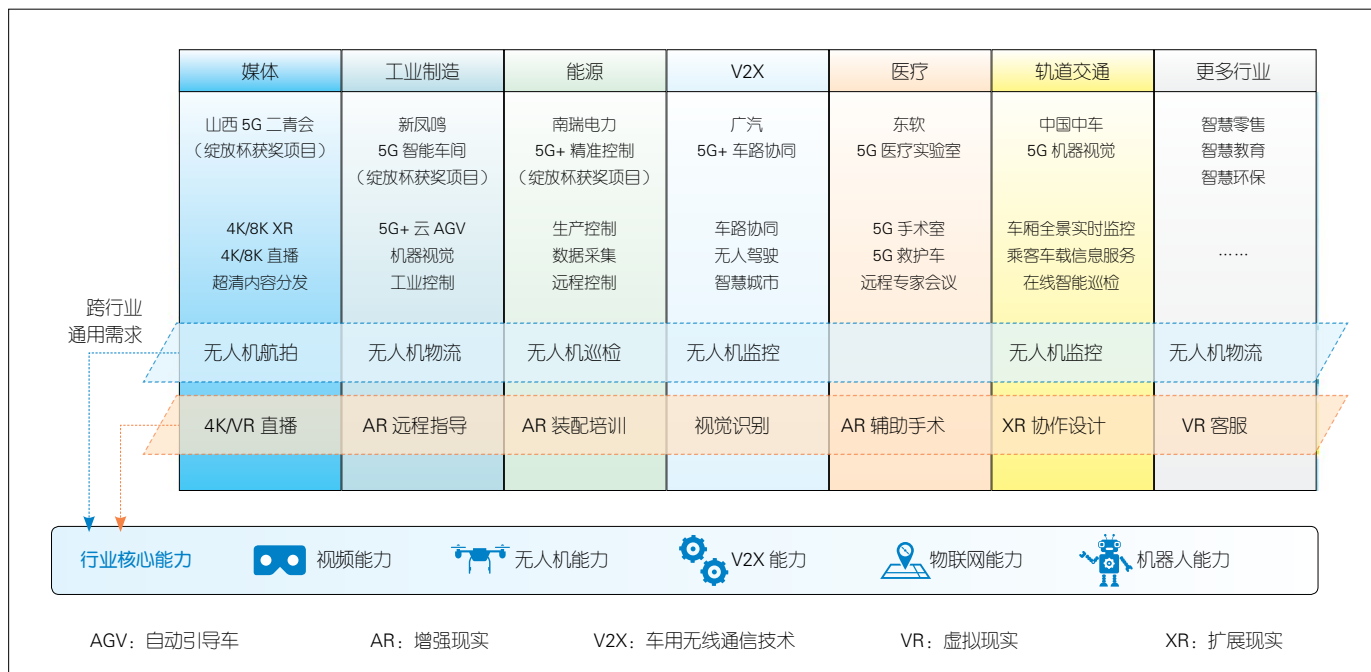
比如无人机和视频能力等。

运营商构建行业核心能力时围绕着这样的通用行业核心能力来规划：从最通用的能力开始规划，逐步积累到更多的行业，具体如图 4 所示。行业核心能力的提供实体对应着行业核心能力平台，比如提供视频能力的视频平台、提供无人机飞控能力的无人机平台。

行业核心能力的提供依赖于对行业的研究与积累，不是一蹴而就的，它需要通过多样化的形式来积累。行业核心能力可以通过自研、合作研发、购买或者收购的形式达成。

### 3 构建核心能力体系，提供行业一站式服务

面向 B 端行业经营拓展时，我们发现只有核心能力可能还是不够的。以 5G+AIBCDDES (AIBCDDES 是人工智能、物联网、区块链、云、大数据、多接入边缘计算和安全的总称) 为代表，基础网络能力的增强和扩展满足了行业用户对基础网络使用的需求。无人机、视频等行业能力满足行业通用应用的部署需求；但这些能力都是分散状态的，行业用户并不能拿来就用，还需要进行能力集成。行业客户



▲图 4 识别跨行业通用需求沉淀行业核心能力

规模有大有小，技术能力也有很大的差异，客户在集成不同能力形成最终方案时还面临技术复杂度的门槛。同时按照现有的方式，行业客户在获取运营商服务时还不够便利，运营商的资源、能力等进行变现时也不够方便，这些都受现有体系架构的制约。因此我们建议，运营商在拓展 5G 行业市场时需要有一套体系来支撑。这个体系可以被称为 5G 核心能力体系，如图 5 所示。

5G 核心能力体系包含 3 大组成部分：核心能力、通用方案、行业商城。其中，核心能力又分为网络核心能力与行业核心能力两大类。

5G 核心能力体系是基于基础网络层来构建的，例如网络能力包括 4G/5G 网络、NB-IoT 网络、专线专网能力、IDC/ 云服务能力、行业服务能力等。通过标准化、产品化的方式抽取这些服务能力，形成 5G 核心能力。5G 核心能力可以直接服务 B 端客户的行业需求，还可以以行业客户需求场景为索引。运营商聚焦在最为典型通

用的场景上进一步开发通用方案。通用方案聚合网络核心能力、行业核心能力以及其他一些外围元素。

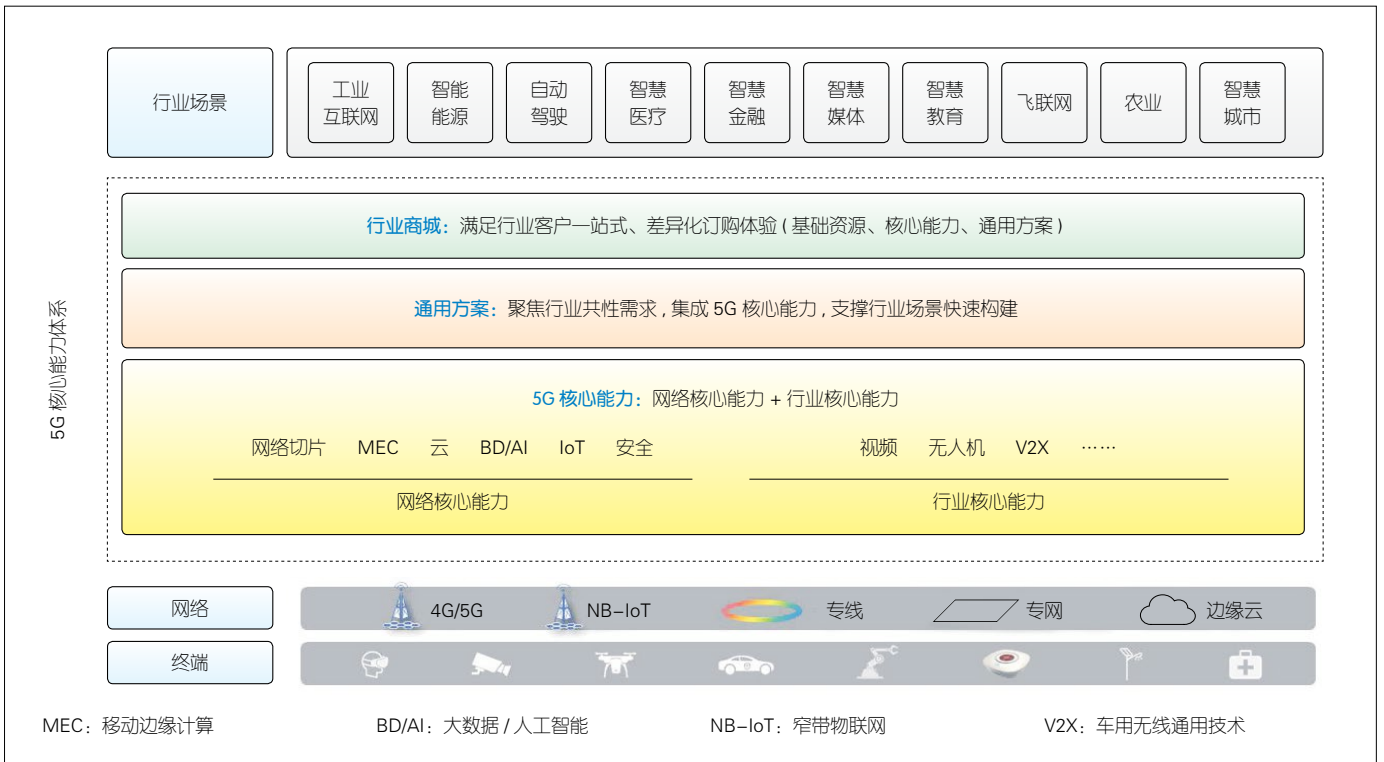
行业商城则是运营商对外服务的门户。不管是基础资源销售、核心能力开放，还是通用方案服务，都需要通过一站式商城对行业客户提供服务。统一的入口在方便客户使用的同时，也能进行资源 / 能力的聚合，最大化激发经营潜力。

可以将 5G 核心能力体系理解成为运营商与行业客户之间的一座桥梁：桥的一边是运营商的服务，能力多维度产品化；一边是行业客户的需求，涉及行业细分场景、能力等多因素。通过核心能力体系可以实现两者的最佳匹配。

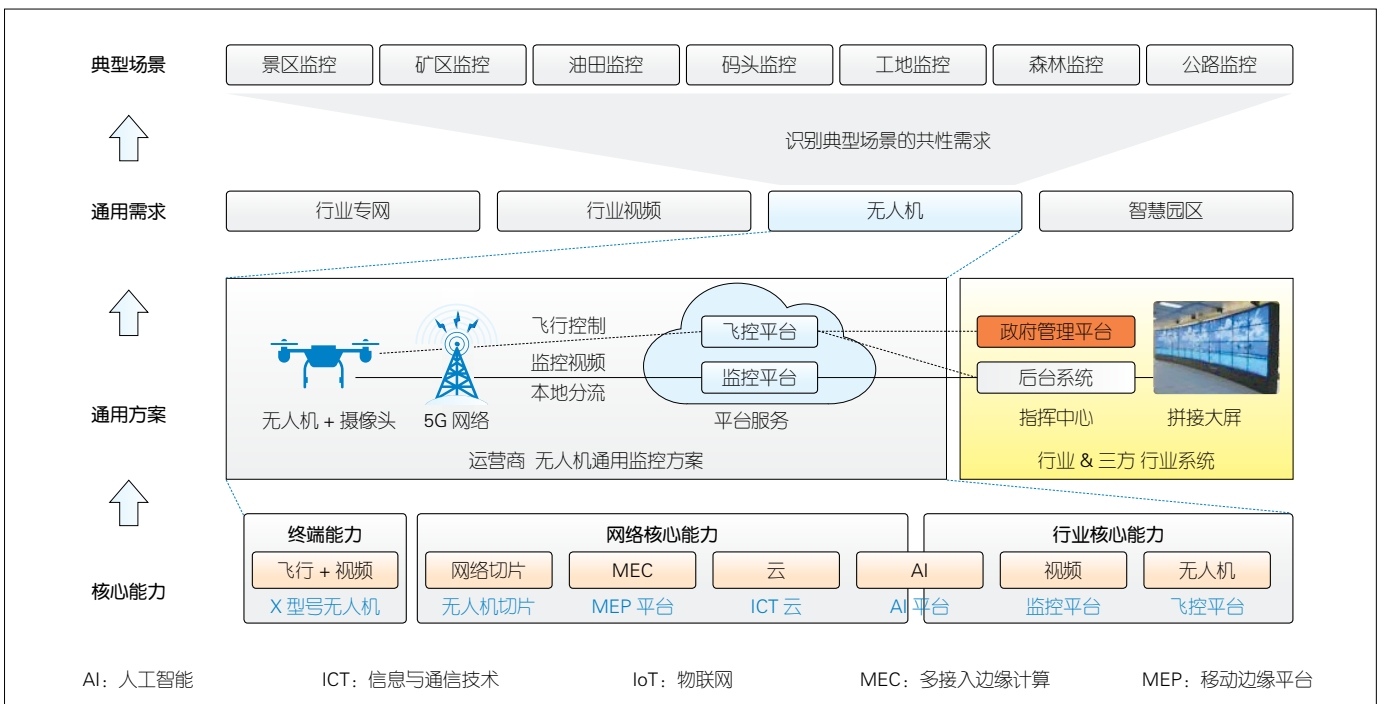
行业用户使用运营商的核心能力服务需要进行方案再集成，这对用户而言具有技术复杂度以及一定的集成所带来的工作量。方案再集成存在着不低的能力门槛，对众多中小行业用户来说是很大的挑战。行业通用方案就是针对这种场景的更高级别的服

务。运营商分析行业场景的共性需求，并集成所需的相关能力形成标准化、成熟的通用方案，行业客户可根据自身需求进行菜单式的选择。如此，行业用户只需要专注于自身的专业领域，无须再投入大量精力进行跨领域能力产品的集成。这可以帮助行业用户进一步聚焦资源加强自有的优势。同时运营商提供通用方案也有相应的优势，即可以利用自身的平台优势、生态优势、规模优势来突破通用方案，降低行业客户部署通用方案的技术和投入门槛。

以图 6 所示的无人机监控为例，在景区监控、矿区监控这些不同的场景中普遍存在着对无人机监控的需求。将这部分无人机监控的需求分析后拆解成两部分：一部分是运营商提供，一部分仍然依赖于外部。左边框中系统对应无人机监控的通用方案，这部分由运营商提供。通用方案汇聚了更下一层的各个能力。制定通用方案的过程也就是标准化各个能力之间的接口规范、互通业务流程以及设备



▲图 5 5G 核心能力体系



▲图 6 5G 行业通用方案（无人机监控方案示例）

型号、系统性能等。通用方案交付的标志是系统各个部分的设备清单以及多个配置模板被明确，行业客户可以

根据配置模板做出选择并快速部署。

B 端市场存在千行万业，运营商提供通用方案时必须首先聚焦在重点

的价值场景上，在积累一定的经验后再逐步展开。在这个阶段我们建议由运营商的政企部门或者产业研究院来





▲图7 一站式行业商城

牵头做通用方案产品设计集成交付工作，必须要多方合作才能形成可交付方案产品，可与终端厂家、设备厂家、行业用户合作，组成通用方案实体团队形式展开工作。

除了通用方案外，我们还需要一个面向B端的服务平台，即一个行业用户了解、采购运营商各类产品的平台。它也是使用与管理的平台，能够提供一站式的入口与全生命周期的服务，被称为一站式行业商城，如图7所示。

行业商城是运营商面向B端服务的新门户，有些类似于服务行业客户的天猫商城，通过货架式的方式展示运营商在B端可提供的所有服务产品。它可以是资源产品，可以是核心能力，也可以是通用方案。产品在行业商城进行全面的展示，产品的详细信息以及服务准则也会被介绍。作为B端服务的入口，行业客户可以在行业商城的各类产品专区中购买所需产品，同时也可以提供产品使用过程中的各类服务，比如用户签约、使用查询等。

总而言之，行业商城给客户提供了—站式的服务，其目标是满足客户所有需求。

对于行业商城的构建，我们建议基于业务运营支撑系统（BOSS）重新构建一个单独的B端门户。C端服务注重标准化以及用户体验，而B端服务更注重的是产品差异化的能力以及全生命周期的服务支撑；因此重新构建可以摆脱现有架构的限制更好地服务B端。另外我们建议行业商城可以先从切片产品专区的构建开始，然后再逐步拓展到其他产品。

#### 4 结束语

2020年是5G规模建设年，拉开了中国5G面向B端行业拓展的大幕。5G网络赋予运营商同时满足C端与B端的能力。对于B端经营面临的新问题，中兴通讯提出的5G核心能力系统的架构理念，可以帮助运营商利用5G新网络赋能垂直行业并拓展新的经营模式，从而推动5G生态的健康发展。

#### 参考文献

- [1] 王强,陈捷,廖国庆.面向5G承载的网络切片架构与关键技术[J].中兴通讯技术,2018,24(1):58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.012
- [2] 宋晓诗,闫岩,王梦源.面向5G的MEC系统关键技术[J].中兴通讯技术,2018,24(1):21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.005

#### 作者简介



网络智能化、云网融合等。

左罗，中兴通讯股份有限公司系统方案部部长，负责中兴通讯系统产品前瞻性综合方案的研究及规划工作；拥有近10年电信行业战略规划、产品规划、市场规划和市场营销经验，主要研究方向为运营商数字化转型、5G E2E网络切片、



陈亚斌，中兴通讯股份有限公司系统方案部综合方案规划总监；长期从事中兴通讯核心产品研发和跨产品综合方案规划工作。



# 高稳频窄线宽半导体激光器

## High Stable Frequency Narrow Linewidth Semiconductor Lasers

**摘要:** 在相干光通信和空间光通信领域, 激光器的线宽和频率稳定性对于保证通信质量起到至关重要的影响, 因此需要采取相应的措施来压窄线宽并保证频率稳定。从芯片工艺入手, 介绍了当前几种典型芯片的结构、性能特点以及其所能达到的线宽和稳频水平。针对高稳频窄线宽的要求, 从主动稳频和被动稳频两种途径介绍稳频技术。为进一步提高稳频效果, 介绍了当前较流行的激光器驱动电路的组成, 以及温控电路的结构和相应的算法处理。

**关键词:** 高稳频; 窄线宽; 半导体激光器

**Abstract:** In the field of coherent optical communication and space optical communication, the linewidth and frequency stability of laser play an important role in ensuring the quality of communication, so it is necessary to take corresponding measures to narrow the linewidth and ensure the frequency stability. Starting from the chip technology, the structure and performance characteristics of several popular chips are proposed, in addition to the linewidth and frequency stabilization level they can achieve. According to the requirements of high frequency stability and narrow linewidth, the frequency stabilization technology is introduced from two ways: active frequency stabilization and passive frequency stabilization. In order to further improve the effect of frequency stabilization, the composition of the current popular laser driver circuit as well as the structure of the temperature control circuit and the corresponding algorithm processing are introduced.

**Keywords:** high frequency stability; narrow linewidth; semiconductor laser

陈伟 /CHEN Wei  
班德超 /BAN Dechao  
穆春元 /MU Chunyuan

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)  
(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003014  
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.tn.20200424.1629.004.html>

网络出版日期: 2020-04-24  
收稿日期: 2020-03-10

信息技术引领社会生产新变革。为缓解目前信息传输速率和容量的压力, 以激光为载体的通信技术正在逐步取代电子通信技术, 其中, 激光器是激光通信系统中的核心元器件, 主要用于光学信号的产生和接收。半导体激光器具有小体积、长寿命、易于集成和可直接调制等优点, 已成为激光通信技术中理想的光源器件。空间激光通信和光纤相干光通信对系统的数据容量、相位噪声和灵敏度等性能指标有较高的要求, 这就要求激光器应具有较窄的线宽、低相位噪声、高频率稳定性和可调谐等特性。不同的应用场景对激光器又有不同的要

求, 例如, 空间光通信不需要激光器具有很宽的调谐带宽, 而是要求其具有窄的线宽, 一般要求洛伦兹线宽在 10 kHz 以下, 并且具有很高的频率稳定性。对于相干光通信系统, 光源不仅需要具有较窄的线宽 (一般要求线宽小于 100 kHz), 而且最好具有宽的调谐范围, 来满足现在的波分复用系统的波长要求, 同时出射光功率一般要求在 10 dBm 以上; 因此, 针对不同的应用场景, 也就需要不同的技术手段来生产和设计相应的激光器模块。

### 1 芯片和器件的制备技术

激光器模块一般包括增益芯片、光路耦合系统、驱动电路、温控电路等几部分。作为核心部分的增益芯片

的工艺比较复杂, 一般包括外延、光刻、腐蚀、溅射等工艺, 其结构层一般包括衬底层、缓冲层、隔离层、限制层、有源层、波导层、欧姆接触层以及外面的电极层等。其中有源层一般为多层量子阱结构, 以提供足够的增益。最简单的是法布里-珀罗 (F-P) 腔激光器, 其内部不存在光栅, 只通过芯片两侧的解理面来形成谐振; 所以其一般为多纵模激射, 主要用于短距离通信。在长距离通信中要求激光器为单纵模, 因此在芯片设计中引入光栅, 其中, 光栅分布在有源层中的为分布反馈 (DFB) 激光器, 光栅位于有源层两侧无源区的则是分布布拉格反射 (DBR) 激光器。DFB 激光器是在一次外延结束后, 通过光刻和刻

基金项目: 国家自然科学基金 (61675196)

蚀工艺在波导层制作所需要的光栅,之后再行二次外延,从而得到晶元片。为避免二次外延对芯片有源层的损伤,也有的工艺采用表面光栅,这种光栅是在外延片生长好之后,在脊波导刻蚀工艺中,通过干法和湿法刻蚀在脊波导上刻蚀一定的深度来形成光栅结构。由于DFB光栅分布在整个有源层区域,其一般有两个激射模。为了解决这个问题,一般在光栅制作过程中引入 $\lambda/4$ 相移,从而实现单纵模激射。DBR激光器芯片的一种制作工艺是把增益区旁边区域刻蚀到有源层以下,之后二次外延得到无源波导层,并在波导层中生长刻蚀光栅结构。DBR激光器的光栅由于是位于有源层两侧或单侧的无源波导层中,因此只有一个激射模式。激光器调谐通过电流注入和电极加热的方式改变波导层中光栅材料的有效折射率,从而改变光栅的中心波长。例如,如文献[1]的作者采用非对称相移光栅设计,通过改变DFB芯片温度(15~85℃)可以实现9.7 nm的波长调谐,同时线宽达到300 kHz。OKAI M.等<sup>[2]</sup>使用波峰调制光栅来代替传统的 $\lambda/4$ 相移,从而实现1.3 nm的调谐范围,线宽达到100 kHz,输出光强度10 mW。可以看出,单个芯片一般调谐范围在10 nm左右,这就限制了其在波分复用系统中的应用。为增加波长调谐范围,激光器阵列<sup>[3]</sup>、取样光栅<sup>[4]</sup>以及外腔光栅激光器<sup>[5]</sup>被提出和研究。其中,外腔激光器可以在实现大范围调谐的同时对线宽进行压窄,例如,文献[5]的作者实现了200 nm的调谐且线宽达到5 kHz。可以看出,光栅的使用不仅可以起到选模作用,当使用多个光栅时,还可以增大调谐范围,并且对输出线宽进行压窄。文献[6]的作者使用两个DBR光栅通过游标效应在选模的同时还实现了线宽压窄,从而使线宽达到

80 kHz,且调谐范围覆盖C波段。由此可见,芯片的设计会从根本上影响其应用性能和应用场景,但是单个芯片必须辅以精准的驱动电路和温控电路才能更好地保证模式、线宽的稳定,同时对于一些稳定性和线宽要求较高的地方还需要稳频技术的辅助才能满足通信要求。

## 2 稳频技术

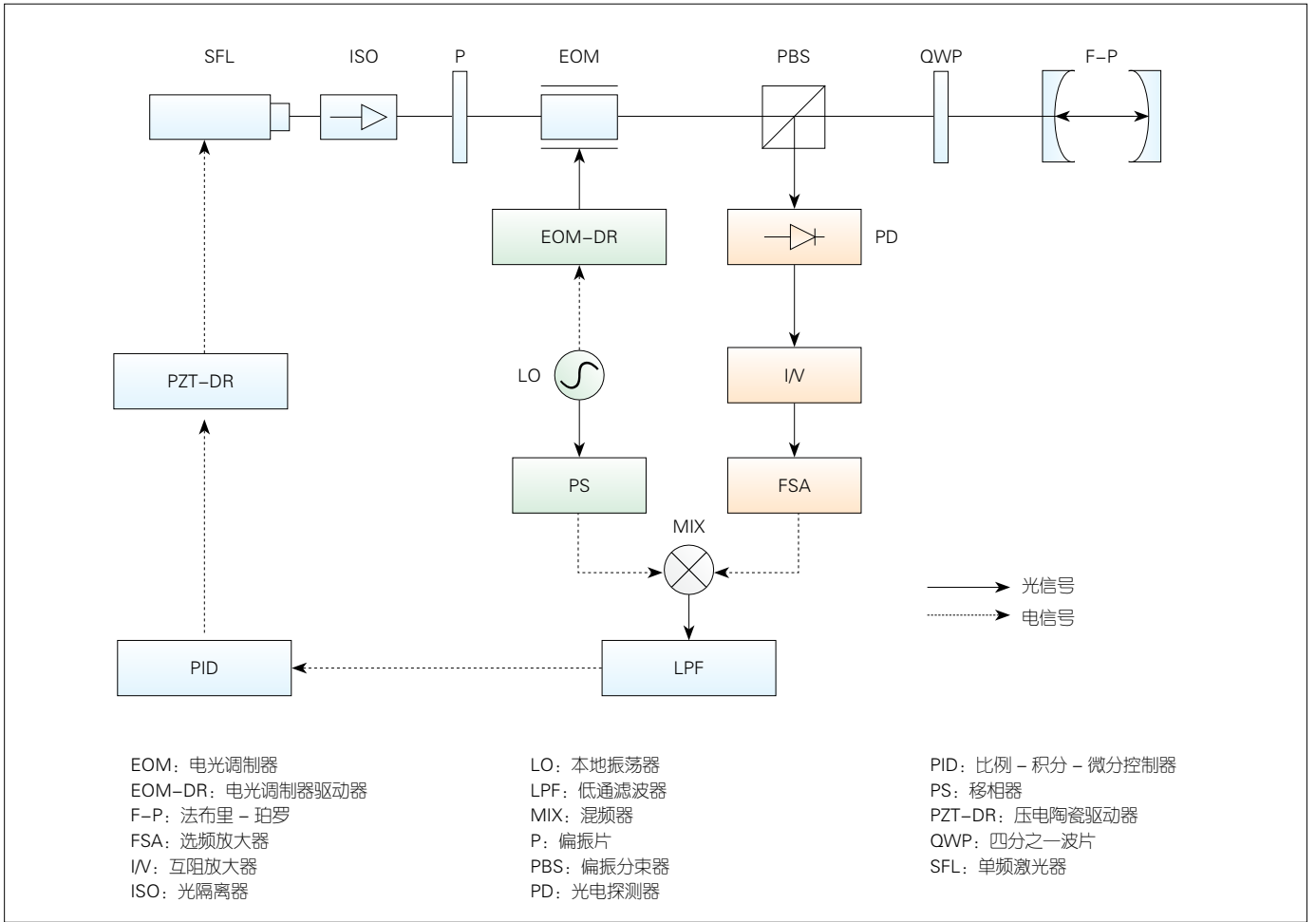
激光器芯片虽然可以通过结构和外延层设计优化来改善其线宽、功率、调谐、边模抑制比等性能,但是由于芯片工作时的温度、电流变化,其频率会出现大的波动甚至会有跳模的发生。这时候就需要检测芯片的输出频率,并对芯片的驱动电流进行调整来实现激光器稳定工作。首先,要获取频率信息一般需要鉴频器,其种类有气体吸收池和F-P标准具。气体吸收池的原理是其内部气体会吸收特定波长的光,之后会由于饱和吸收效应透射谱上会出现透射峰,通过调整驱动电流使得激光器频率稳定在这一透射峰附近。在光通信领域常用的气体吸收池是氦气(1 291 nm)和乙炔(1 510~1540 nm)。F-P标准具的透射谱由一系列的透射峰组成,一般选择其中一条作为参考。由于温度会改变标准具的腔长,所以一般选用低热膨胀系数的材料制作标准具,并辅以相应的温控系统。通过鉴频器获取频率信息之后,还需要提取信息并分析,然后调整驱动电流或者其他一些如外腔腔长、光栅倾角等参数。Pound-Drever-Hall(PDH)算法<sup>[7]</sup>就是一种通过F-P标准具获取频率信息来实现稳频的技术,其系统如图1所示<sup>[8]</sup>。这种技术的原理是单频激光通过电光调制器(EOM)之后会在载频两侧产生幅度相等相位相反的两个边带,将调制光与载波拍频,如果激光等于F-P

标准具的共振频率,则拍频后两个边带会互相抵消,输出电流为零,若是与F-P标准具的共振频率存在一定差距,则会输出一个电信号。这个电信号经过滤波、放大后即可作为稳频的误差信号,并由此调节激光器的频率。文献[9]中作者采用PHD算法把线宽压窄到1.5 Hz,同时频率稳定度小于 $2 \times 10^{-15}$ 。

上面提到的稳频技术都是通过获取芯片频率信息、主动改变激光器的工作状态来保证激光器的频率稳定,属于主动稳频技术。相应的还有被动稳频,其鉴频器也是F-P标准具,根据F-P腔对不同波长的光具有不同的反射系数这一性质,就可以把激光器的频率噪声转化成强度噪声<sup>[10]</sup>。这种被动稳频的原理也称为光负反馈作用,首先确定需要稳定的频率点,当出射光频率大于这个频率点时,反馈光强度会变大,从而抑制腔内的载流子浓度,根据等离子效应有效折射率会升高,从而导致出射光频率降低,反之则频率升高。通过上述途径就可以使激光器的频率稳定在需要的频率点,并且压窄线宽,例如,文献[10]得到线宽3 kHz的单频输出。

## 3 低噪声恒流驱动技术

上文虽然提到通过获得激光器的频率信息,然后调整芯片的驱动电流来实现激光器频率的稳定,但那是其驱动电流中不含有噪声的情况。如果驱动电流存在扰动,则会引起芯片电流密度产生数量级的变化,将严重影响激光器的输出模式、功率、相位噪声、线宽等,如在1 550 nm附近1 mA的驱动电流变化可以引起输出光频率变化约360 MHz<sup>[11]</sup>;因此,在激光器的恒流驱动设计中,要充分考虑激光器的电学参数,在合理的范围内做好限流、防浪涌和过冲等安全保护措施。



▲图1 Pound-Drever-Hall (PHD) 系统图<sup>[8]</sup>

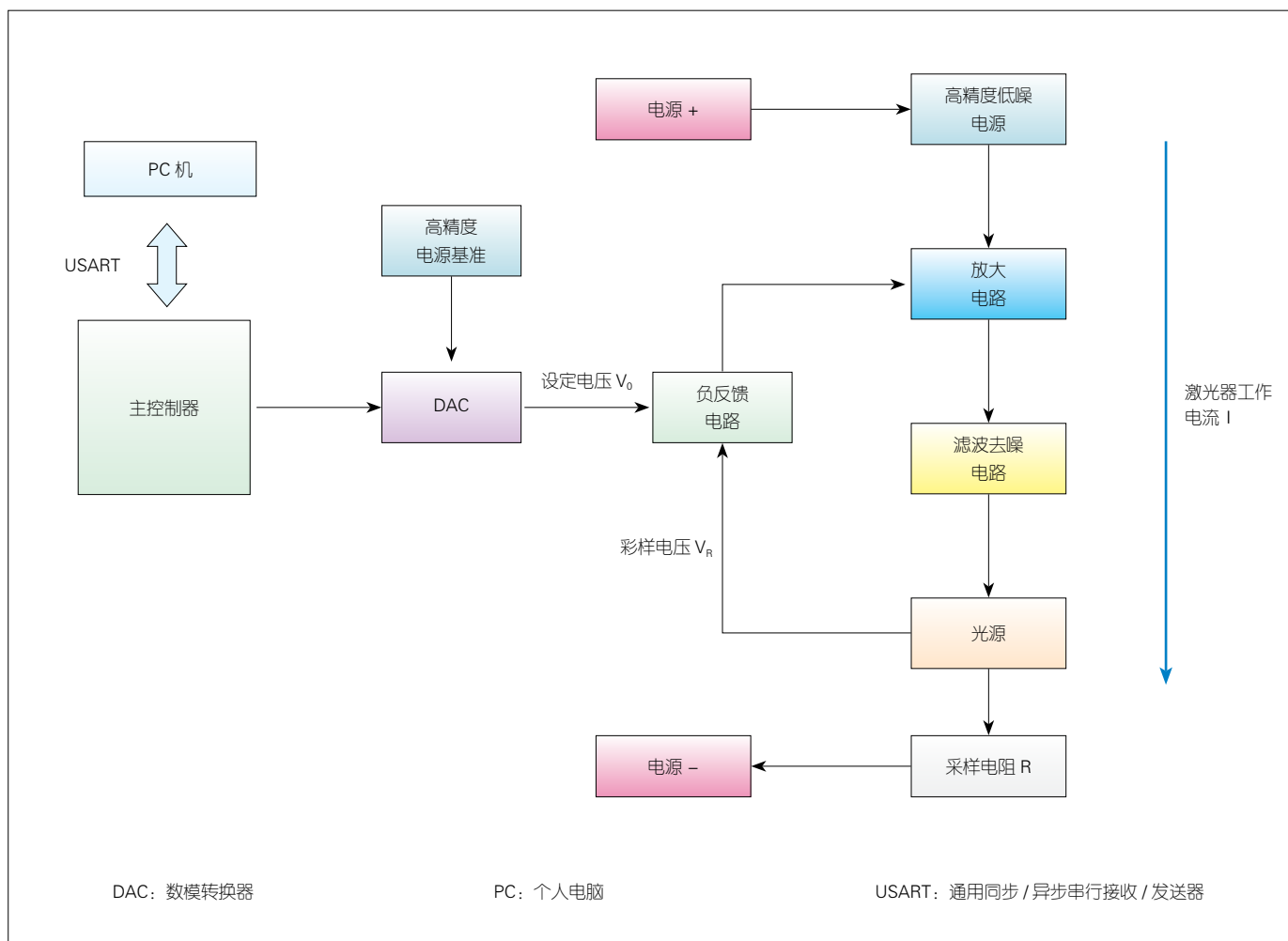
例如，文献 [12] 中作者提出的双通道驱动电路，其波纹系数小于 0.075%。华南理工大学<sup>[13]</sup>设计的电流负反馈驱动电路，可以实现 0.5% 的高稳定度电流输出，并设计相应的延时启动电路以防止电流浪涌的影响。作为驱动电路中常用的电流负反馈系统，如图 2 所示，其主要功能模块包括：（1）总控功能模块，由微控单元（MCU）、数模转换器（DAC）、高精度电源基准构成，主要负责反馈电路的数据采集、校准、延时控制设定以及对外通信（如外接 PC 机）等工作；（2）电流采集和负反馈控制模块，由采样电阻、负反馈电路和放大电路三者组成，它们协同工作完成负反馈恒流控制；

（3）滤波去噪模块，主要由滤波去噪电路和容感器件组成，其作用是对电流驱动系统的电、热噪声进行处理，以消除噪声对激光器的影响。只有保证激光器驱动电流的稳定，才能避免电流噪声的影响，减少由电流噪声引起的波长偏移和抖动。

#### 4 高精度温度智能控制

半导体激光器是一种的电-光转换器件，它的一般的工作原理是：在电流驱动下，半导体工作物质的导带与价带之间或半导体物质的受主与施主之间，实现非平衡载流子的粒子数反转，处于粒子数反转态的大量电子与空穴复合，产生受激辐射，在谐

振腔的作用下形成受激振荡输出激光；但是，由于存在非辐射复合损耗、自由载流子吸收等损耗机制，激光器芯片的外微分子效率只能达到 20% ~ 30%，同时大部分的注入电流转化为热量，导致激光器的温度升高，阈值电流增大，激光器输出光功率降低，波长偏移以及模式跳模。以用半导体外腔激光器的空间光通信为例，温度每变化 1℃，激光器的波长变化约为 10 pm，温度的不稳定将严重影响相干调制以及空间通信系统的使用。另一方面，在一些如太空、海底以及沙漠等恶劣环境下，温度变化较为剧烈，使得激光器件的温度更加难以控制；因此，为了保证激光器在不同温



▲图2 恒流控制结构框图

度环境下都能正常工作，必须对激光器实现高精度温度控制。

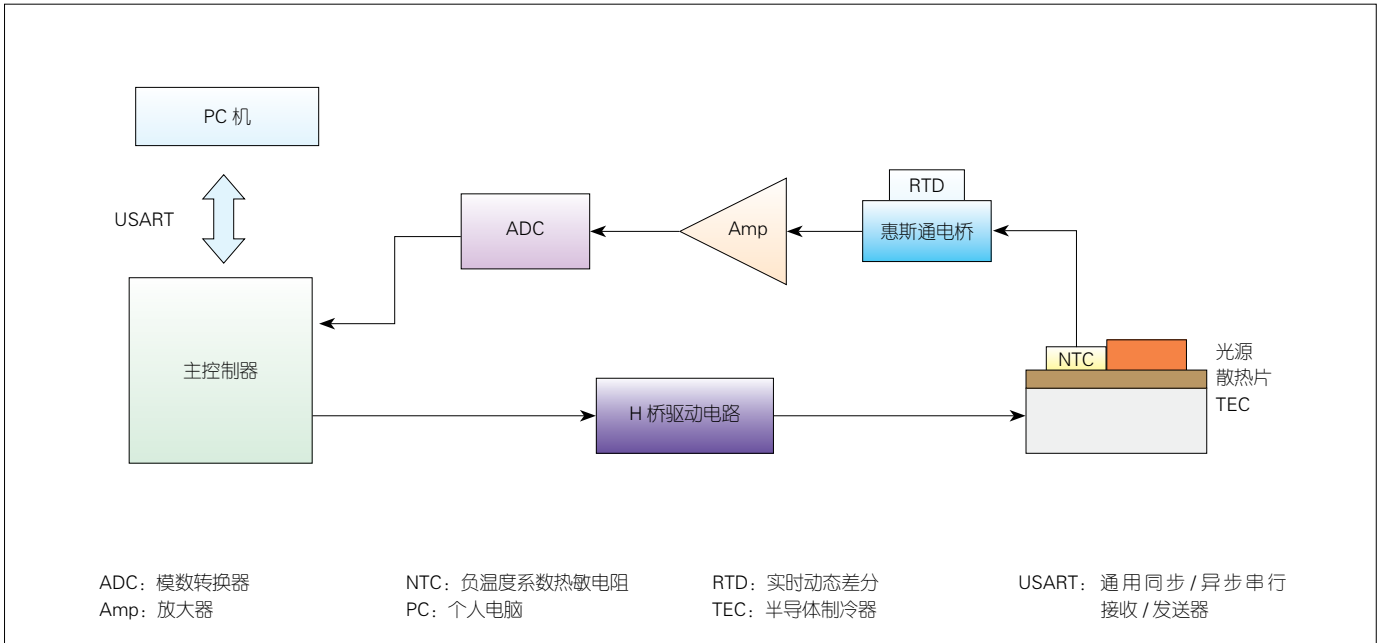
当前存在大量的激光器温度控制方法，比如，通过使用控温芯片 MAX1968，文献 [14] 和 [15] 的作者分别实现  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。现在使用最为广泛的则是传统的模拟比例-积-微分 (PID) 控制方式，如文献 [16] 的作者使用热敏电阻结合模拟 PID 电路的方案实现  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。模拟 PID 电路的优点是其简单的电路比较好实现，缺点是整定、修改参量繁琐，而且与其他仪器传输数据较为困难；所以，现在的研究多用数字电路来解决

温度控制。如文献 [17] 的作者基于粒子群自整定 PID 算法实现  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。数字 PID 控制电路的具体温控系统框图如图 3 所示，该系统主要由主控单元 (MCU)、高精度模数转换器 (ADC)、负温度系数热敏电阻 (NTC)、实时动态差分 (RTD) 电路、预放大电路以及半导体制冷器 (TEC) 控制电路组成。其中，PC 机与主控单元可以进行通信，实现程序下载和维护；ADC 会采集由预放大电路放大的电压模拟信号，之后把信号传送给 MCU；MCU 通过对内部编写的 PID 算法进行分析后，改变 TEC 的电压从而对芯片进行加热

或者制冷。采用这种技术的外腔激光器，可以使温度漂移低于  $0.0010\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，线宽达到  $4.5\sim 7.5\text{ kHz}$ <sup>[18]</sup>。

## 5 结束语

从上文的讨论中可以看出，要想实现激光器的窄线宽高稳频输出，可以从芯片工艺出发，改进芯片结构来实现激光器性能的优化。不同的应用场景可以选择 DFB、DBR、取样光栅 (SG)-DBR 或者其他集成多个光栅和放大器的芯片。为进一步提高激光器的稳定性和单频特性，压窄线宽可以结合外腔光反馈和电反馈等稳频技术来改善激光器的输出特性。应



▲图3 温控系统结构框图

用低噪声的电流驱动电路和精准的温度控制电路保证了稳频系统和芯片工作环境的稳定，使其免受电流噪声和热噪声的影响。

参考文献

[1] FAUGERON M, TRAN M, PARILLAUD O, et al. High-power tunable dilute mode DFB laser with low RIN and narrow linewidth[J]. IEEE photonics technology letters, 2013, 25(1): 7-10. DOI: 10.1109/pt.2012.2225419

[2] OKAI M, TSUCHIYA T. Tunable DFB lasers with ultra-narrow spectral linewidth[J]. Electronics letters, 1993, 29(4): 349. DOI: 10.1049/el:19930236

[3] HATAKEYAMA H, NANIWAE K. Wavelength-selectable microarray light sources for s-, c- and l-bands WDM applications[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Anaheim, CA, USA. Opt Soc. America. DOI: 10.1109/ofc.2002.1036308

[4] MASON B, FISH G A, DENBAARS S P, et al. Widely tunable sampled grating DBR laser with integrated electroabsorption modulator[J]. IEEE photonics technology letters, 1999, 11(6): 638-640. DOI: 10.1109/68.766769

[5] BENNETTS S, MCDONALD G D, HARDMAN K S, et al. External cavity diode lasers with 5 kHz linewidth and 200 nm tuning range at 155 um and methods for linewidth measurement[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10642. DOI: 10.1364/oe.22.010642

[6] Matsui Y, Eriksson U, Weststrom J O, et al. Narrow linewidth tunable semiconductor laser[C]//Compound Semiconductor Week. USA: IEEE, 2016

[7] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-

Hall laser frequency stabilization[J]. American journal of physics, 2001, 69(1):79-87. DOI: 10.1119/1.1286663

[8] 齐艺超. 窄线宽激光器稳频技术研究[D]. 中国科学院半导体研究所, 中国科学院大学, 2019

[9] STOEHR H, MENSING F, HELMCKE J, et al. Diode laser with 1 Hz linewidth[J]. Optics letters, 2006, 31(6): 736-738. DOI: 10.1364/ol.31.000736

[10] AOYAMA K, YOKOTA N, YASAKA H. 3 kHz spectral linewidth laser assembly with coherent optical negative feedback[J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(3): 277-280. DOI: 10.1109/pt.2017.2783365

[11] VODHANEL R S, ELREFAIE A F. Performance of direct frequency modulation DFB lasers in multigigabit per second ASK, FSK, and DPSK lightwave systems[C]//Optical Fiber Communication, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 1990. DOI: 10.1364/ofc.1990.tu16

[12] 胡晓青, 车延博, 薛慧云. 高精度双通道激光器恒流驱动电源设计[J]. 激光杂志, 2015, 36(7): 8-12. DOI: 10.14016/j.cnki.jgzz.2015.07.008

[13] 程前, 邓华秋. 半导体激光器驱动电路及温控系统设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 1185-1189

[14] 罗亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 200-204

[15] 吴栋. 可调谐窄线宽半导体激光器驱动设计[D]. 深圳: 深圳大学, 2017

[16] 吴俊, 李长俊. 基于TEC的高精度温控系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(20): 75-79. DOI: 10.14022/j.cnki.dzsjgc.2017.20.019

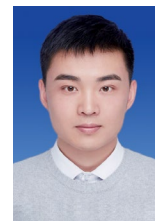
[17] 齐艺超, 陈伟, 穆春元, 等. 基于粒子群自整定PID算法的激光器温度控制系统[J]. 激光技术, 2019, 43(5): 60-64. DOI: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.05.012

[18] 谭俊, 穆春元, 王跃辉, 等. 同频段异频点高稳定四路集成激光器模块[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 36-44

作者简介



**陈伟**, 中国科学院半导体研究所副研究员; 主要研究方向为光电子器件及模块, 长期从事光电子器件及模块的研究工作; 主持设计研制的窄线宽可调谐激光器正样产品, 已在5颗北斗卫星的星间激光通信系统中获得应用; 获授权发明专利40余项, 荣获2016年中国通信学会科学技术一等奖、2018年军队科技进步一等奖、2018年国家技术发明二等奖。



**班德超**, 中国科学院大学在读博士研究生; 从事可调谐窄线宽和光通信系统研究工作; 发表SCI论文2篇。



**穆春元**, 中国科学院半导体研究所工程师; 主要从事窄线宽激光器及光电模块研发工作。

# 《中兴通讯技术》杂志（双月刊）投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术，以展现通信技术最新发展动态，并促进产学研合作，发掘和培养优秀人才，为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1) 作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台：[tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)，并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿，并根据审稿意见，公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用 WORD 文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过 6000 字（包括文、图），内容包括：中、英文题名，作者姓名及汉语拼音，作者中、英文单位，中文摘要、关键词（3 ~ 8 个），英文摘要、关键词，正文，参考文献，作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过 20 个汉字，中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要，包括研究的目的、方法、结果/结论，以 150 ~ 200 字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚，上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精（以 8 幅为上限），应随文出现，切忌与文字重复。图、表应保持自明性，图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表，表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 所有文献必须在正文中引用，文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为：
  - 期刊 [序号] 作者. 题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 书籍 [序号] 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 论文集中析出文献 [序号] 作者. 题名 [C]// 论文集编者. 论文集名 (会议名). 出版地: 出版者, 出版年 (开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 学位论文 [序号] 作者. 题名 [D]. 学位授予单位所在城市名: 学位授予单位, 授予年份. 数字对象唯一标识符
  - 专利 [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准 [序号] 标准名称: 标准编号 [S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9) 作者超过 3 人时，可以感谢形式在文中提及。作者简介包括：姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供正面、免冠、彩色标准照片一张，最好采用 JPG 格式（文件大小超过 100 kB）。
- (11) 应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12) 提供联系方式，如：通讯地址、电话（含手机）、Email 等。

### 3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在 2 个月（自来稿之日算起）以内未接到录用通知者，可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播，加强学术交流，在论文发表后，本刊享有文章的转摘权（包括英文版、电子版、网络版）。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘，请在投稿时说明。
- (3) 编辑部地址：安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室，邮政编码：230061。
- (4) 联系电话：0551-65533356，联系邮箱：[magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)。
- (5) 本刊只接受在线投稿，欢迎访问本刊投稿平台：[tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)。

# 中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

## 办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英  
迎接挑战, 把握世界通信技术动态  
立即行动, 求解通信发展疑难课题  
励精图治, 促进民族信息产业崛起

---

双月刊 1995 年创刊 总第 152 期

2020 年 6 月 第 26 卷 第 3 期

主管: 安徽出版集团有限责任公司

主办: 时代出版传媒股份有限公司

深圳航天广宇工业有限公司

出版: 安徽科学技术出版社

编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜

主编: 蒋贤骏

执行主编: 黄新明

责任编辑: 徐烨

编辑: 杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪

设计排版: 徐莹

发行: 王萍萍

外联: 卢丹

编务: 王坤

---

《中兴通讯技术》编辑部

地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室

邮编: 230061

网址: [tech.zte.com.cn](http://tech.zte.com.cn)

投稿平台: [tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)

电子信箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)

电话: (0551)65533356

传真: (0551)65850139

发行范围: 公开发行

印刷: 合肥添彩包装有限公司

出版日期: 2020 年 6 月 28 日

中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

定价: 每册 20.00 元