



面向 5G 承载的 IP RAN 演进及关键技术

何晓明¹, 岳萍², 卢泉¹, 尹远阳¹

(1. 中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院, 广东 广州 510630;

2. 中国电信集团有限公司, 北京 100032)

摘要: IP RAN 需要适配 5G 网络架构的变化, 满足 5G 定义的 eMBB、uRLLC、mMTC 等多业务差异化承载需求。“大带宽、低时延、灵活连接”网络能力是面向 5G 承载的 IP RAN 的基本要求。首先分析了 5G 业务需求和网络架构特性, 提出面向 5G 承载的 IP RAN 演进方案, 然后对 5G 承载的 IP RAN 关键技术进行研究和试验验证, 为 5G 大规模商用化部署提供支撑和建议。

关键词: 5G 承载; IP RAN; SR; EVPN; 网络切片

中图分类号: TN915.41

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020001

Evolution and key technologies of 5G-oriented IP RAN

HE Xiaoming¹, YUE Ping², LU Quan¹, YIN Yuanyang¹

1. Intelligent Network and Terminal Research Institute, China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

2. China Telecom Corporation, Beijing 100032, China

Abstract: IP RAN need to adapt to the changes of 5G network architecture to meet the differentiated bearing requirements of eMBB, uRLLC and mMTC services defined by 5G. The network capabilities of “large bandwidth, low latency, flexible connection” are the basic requirements of IP RAN for 5G bearer. Firstly, the characteristics of 5G services and network architecture were analyzed, and the 5G-oriented IP RAN evolution scheme was proposed. Then, the key technologies of 5G-bearer IP RAN were investigated and tested to provide support and suggestions for large-scale commercial deployment of 5G.

Key words: 5G bearer, IP RAN, SR, EVPN, network slicing

1 引言

5G 能够丰富人们的文化娱乐生活, 加快经济发展和进步, 开启“万物互联”时代的到来。ITU 为 5G 定义了 eMBB (enhanced mobile broadband, 增强移动宽带)、uRLLC (ultra reliable &

low latency communication, 超低时延高可靠通信)、mMTC (massive machine type communication, 大规模机器类通信) 三大应用场景^[1]。5G 承载带宽相比 4G 提升 10 倍, 时延是 4G 的 1/10, 连接数量相比 4G 提升百倍, 对 5G 承载网的性能要求提出了挑战^[2]。与此同时, 5G 无线接入网 (radio



access network, RAN) 形成多种架构标准, 存在集中单元 (centralized unit, CU)、分布式单元 (distributed unit, DU) 合设和分离等多种部署方式^[3]。5G 核心网将向服务化架构演进, 实现基于 SDN/NFV 的架构重构, 相比 4G 的变化主要体现在核心网云化、控制和转发分离、用户面功能 (user plane function, UPF) 分布式部署等特征^[4-6]。同时, 5G 核心网还引入移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC), 实现内容、服务和应用的本地化、分布式部署, 大幅降低时延、减少网络传输开销、提升业务体验^[7-8]。因此, 5G 网络连接相比 4G 更为复杂, 5G 承载网需要提供更加灵活的网络连接能力, 流量流向的多元化需求推动着 5G 承载网向网状网转变。满足“大带宽、低时延、灵活连接”网络能力是 5G 承载的基本要求。5G 网络全面部署是极为复杂的系统工程, 须谋定而后动, 但“5G 商用、承载先行”的理念已是全球运营商的共识。总体看来, 5G 将全面推动承载技术迎来新一轮发展契机, 5G 承载已成为业界关注的焦点。

IP RAN 是以 IP/MPLS 协议为基础的电信级承载网络, 已成为全球移动运营商 4G 回传主流承载方式, 在全球范围得到广泛部署。同时, IP RAN 在 4G 回传承载所积累的丰富的运维管理经验也为未来 5G 承载部署打下了坚实基础。本文首先分析 5G 业务和网络架构特性, 提出面向 5G 承载的 IP RAN 演进方案, 然后对 5G 承载的 IP RAN 关键技术进行研究和试验验证, 为 5G 大规模商用化部署提供支撑和建议。

2 面向 5G 承载的 IP RAN 演进

2.1 5G 三大业务场景差异化需求

在 ITU 为 5G 定义的 eMBB、uRLLC、mMTC 这 3 类典型的业务场景中, 5G 承载所面临的挑战各不相同。

(1) eMBB 主要面向超高清视频、虚拟现实

(virtual reality, VR)/增强现实 (augmented reality, AR)、高速移动上网等大流量移动宽带应用, 关键性能指标包括 100 Mbit/s 用户体验速率 (热点场景可达 1 Gbit/s)、每平方千米数十 Tbit/s 的流量密度、时速高达 500 km 的移动性等。其中, AR/VR 这类沉浸式体验对时延的要求在 10 ms 量级。单用户移动接入带宽可类比当前的固定接入带宽, 接入速率相比 4G 网络增长了 10 倍, 对承载网提出了超大带宽需求。

(2) uRLLC 主要面向工业控制、无人机控制、自动驾驶等应用, 要求承载网具有超低时延和高可靠性能力, 自动驾驶、实时监测等要求毫秒级的时延, 某些先进制造过程自动化对时延要求在 10 ms 以内, 而且对操作控制要求 100% 的可靠性。当前网络架构和技术在时延保证方面存在不足, 需要网络切片、低时延网络等技术突破, 承载网面临设备硬件、软件、架构等全面挑战。

(3) mMTC 应用主要面向行业基于传感器的数据采集和远程控制, 涵盖工业、农业、生态环境等方方面面的物联网应用, 同时呈现行业多样化和差异化, 要求网络能提供“无处不在”的海量连接能力。

2.2 5G 网络架构演进

3GPP 标准化组织提出了面向 5G 无线接入网的功能重构方案, 引入集中单元和分布式单元分离架构。相对于 4G RAN 的基带处理单元 (base band unit, BBU) 和射频拉远单元 (radio remote unit, RRU) 两级结构, 5G 新空口 gNB 可采用 CU、DU 和有源天线单元 (active antenna unit, AAU) 三级结构。5G RAN 的 CU 和 DU 存在多种部署方式, 当 CU、DU 合设时, 5G RAN 与 4G RAN 结构类似, 相应承载也由前传和回传两部分构成; 当 CU、DU 分设时, 相应承载将演进为前传、中传、回传三级结构。随着 5G 大规模商用, 将推动 5G 无线接入网向 CU 和 DU 分离的云化 RAN 部署。

受业务发展的驱动,5G 核心网将发展成为服务全业务场景的云化泛在网络。5G 核心网将采用服务化架构和 SDN/NFV 技术实现架构重构,具有业务虚拟化隔离、转发与控制分离、功能分布式部署等特征。由于 5G 需要同时承载 eMBB、uRLLC、mMTC 等各类业务,这些业务在移动性、计费、带宽、时延、可靠性、安全性等方面存在巨大差异,需要核心网实现对不同业务的虚拟化隔离和网络切片。另一方面,5G 核心网将控制面功能(control plane function, CPF)和用户面功能分离,统一的 CPF 将部署在省干或大区的核心机房或数据中心(data center, DC),实现业务集中管控;分布式的 UPF 可根据业务需要按需部署在省干核心 DC、本地 DC 或边缘 DC。5G 核心网目标架构如图 1 所示。

2.3 5G 承载的 IP RAN 演进

由于 5G RAN 可演进为 CU、DU、AAU 三级结构,相应承载将演进为前传、中传、回传三级新型网络架构。当前 IP RAN 已成为 4G 回传的深度广覆盖承载网络基础设施,其网络架构同样适配 5G 初期 CU、DU 合设时的 RAN 结构。随着 5G 规模商用,RAN 逐渐实现云化部署,CU 与 DU 分离,IP RAN 在接入层需要同时实现中传和回传的统一承载。5G 中传网络实现 DU 与 CU 之

间流量承载,由接入层负责;5G 回传网络实现 CU 和核心网之间、CU 和 CU 之间、数据中心之间相关流量承载,由接入、汇聚、核心三层构成。为降低时延敏感的 uRLLC 类业务和部分对时延要求较高的 eMBB 类业务传输时延,提升业务体验,5G 核心网还将在边缘接入层和城域汇聚层数据中心部署 MEC。对于云化的 RAN,也将在边缘接入层数据中心部署 CU。因此,5G 承载的 IP RAN 将演进为面向 5G 中传、回传和数据中心互联的统一承载网。演进的 IP RAN 的网络结构如图 2 所示。

面向 5G 承载的 IP RAN 必须具有“大带宽、低时延、灵活连接”的网络能力。下面对这三大网络能力进行分析。

(1) 组网带宽要求

根据预测评估,典型 5G 低频单基站峰值带宽将达到 5 Gbit/s,高频单基站峰值带宽将达到 10 Gbit/s 水平。这要求接入环具有 25 Gbit/s/50 Gbit/s 组网能力,汇聚层要求具有 100 Gbit/s/200 Gbit/s 能力,核心层带宽要求具有 $N \times 200$ Gbit/s/400 Gbit/s 组网能力。随着新一代支持 25GE/50GE 以太网接口标准产业链的成熟,基于 PAM4 技术的低成本 50GE 以太网能有效匹配 5G 接入环带宽诉求,为运营商提供了接入环的高性价比方案^[9]。50GE 多



图 1 5G 核心网目标架构

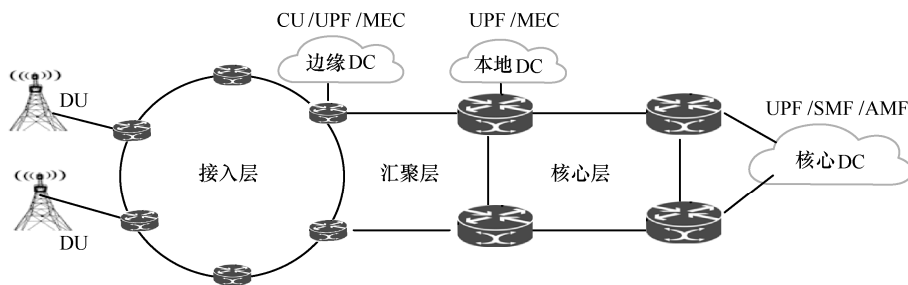


图 2 演进的 IP RAN 的网络结构



路集成还可以实现 200GE/400GE 等更大带宽以太网，基于 PAM4 的 200GE/400GE IEEE 802.3bs 标准已于 2017 年 12 月发布。基于新一代大带宽低成本以太网基础设施构建 5G 承载的 IP RAN 将大有作为。

(2) 时延要求

超低时延是 5G 关键特征之一。由于 IP RAN 需要实现 5G eMBB、uRLLC、mMTC 业务的统一承载，这 3 类业务应用场景对承载网的 QoS 要求存在较大差异。当前 4G 承载的 IP RAN 基于 IP 的统计复用技术，利用 QoS 技术实现不同业务的服务质量保障。由于 IP 报文转发时延受设备缓存设置、流量突发、报文长度等因素的影响，难以提供确定性的时延和时延抖动保证。基于 IEEE 802.1 标准的时延敏感网络（time sensitive networking, TSN）提供了 MAC 层低时延业务调度的优先级抢占调度机制，可以改善低时延业务的性能。基于时分复用（time division multiplexing, TDM）的灵活以太网接口（FlexE）可实现业务硬隔离，能够为即将出现的 uRLLC 类应用提供确定性的低时延保证，成为业界关注的热点。

(3) 灵活连接要求

5G 核心网、无线接入网的云化和 UPF 的分布式部署对承载网提出了灵活连接要求。在 4G 时代，基站到核心网的连接以南北向 S1 流量为主，并且终结 S1-U 和 S1-C 的 EPC 核心网部署位置基本相同。随着 5G 核心网的 UPF 下沉到城域汇聚层和接入边缘层，基站到不同层面核心网的 S1-C（N2 连接）和 S1-U（N3 连接）的终结位置存在差异，并且存在不同层面核心网元之间流量互访需求，如 UPF 与 UPF 之间的 N9 连接、UPF 与 SMF 之间的 N4 连接等^[4-5]。此外，无线接入网的相邻基站之间也存在动态的 eX2 连接，需要部署 L3 功能到接入层边缘，通过环内基站之间流量就近转发以降低基站之间流量绕转至汇聚节点引起的转发时延，提高带宽效率。5G 网络接口及网络连接要求如图 3 所示。总之，5G 网络流量流向的多元化和不确定性要求 IP RAN 提供灵活的网络连接能力和路由能力。

3 IP RAN 关键技术

IP RAN 需要适配 5G 网络架构的变化，满足

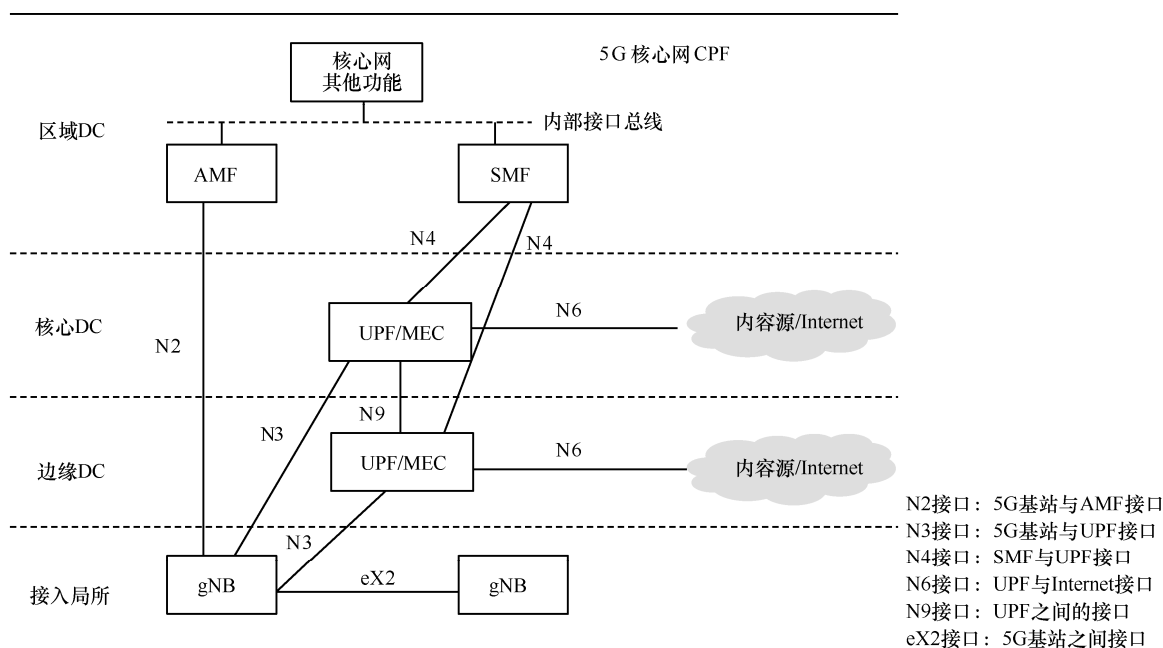


图 3 5G 网络接口及网络连接要求

eMBB、uRLLC、mMTC 等多业务差异化承载需求。“大带宽、低时延、灵活连接”网络能力是面向 5G 承载的 IP RAN 的基本特征。传统 4G 回传 IP RAN 存在“控制协议复杂、连接灵活性差、难以满足超低时延业务承载需求、网络智能化程度低、运维效率低”等局限性,需要引入分段路由(segment routing, SR)、EVPN 等技术简化控制协议,增强网络连接的灵活性;通过引入 FlexE 低时延分片技术降低网络传输时延。同时,引入 SDN 技术增强网络智能,加快业务部署,提升网络运维效率,实现网络和业务的全生命周期管理。

3.1 SR 实现极简网络

SR 是一种源路由技术^[10-11],由头节点维护策略状态,转发路径的中间节点无需维护策略状态,大大简化网络为维护策略状态信息所需复杂信令协议。它通过 IGP 和 BGP 扩展向全网泛洪前缀、节点、链路等段标签(segment identifier, SID)信息,无需附加的信令协议(如 LDP、RSVP-TE 等)来分发标签。SR 不仅简化了标签交换路径建立的信令协议,而且在流量工程(traffic engineering, TE)、跨域隧道建立、业务保护等方面比 LDP 更具优势。

(1) 流量工程

在流量工程实现方面,结合 SDN 控制器可以很好地实现网络路径的可编程能力,通过控制器维护全局拓扑和流量工程信息,根据业务请求和路径策略(时延、跳数、带宽、亲和属性等)自动计算得到满足条件的业务路径,并根据网络状态动态调整路径,实现路径优化和负载均衡^[12]。

(2) 跨域隧道建立

传统实现跨域 MPLS 隧道的建立需借助 BGP 通告远端 PE 绑定的公网标签,使用 BGP 跨域分发前缀绑定标签信息要遵循 RFC8277 规定。SR 网络可采用多种技术来实现跨域 MPLS 隧道的建立,如 BGP-EPE^[13]、BGP-LU^[14]、BGP-SR^[15]等。BGP-LU 和 BGP-SR 方式都需要通过 BGP 跨域分发远端 PE 前缀绑定标签信息,而 BGP-EPE 方式只需要 ASBR 支持 EPE,无需通过 BGP 跨域分发远端 PE 前缀绑定标签信息,简化了控制协议。借助于跨域 SDN 控制器,BGP-EPE 方式建立跨域隧道时可根据域间多出口负载均衡情况动态选择最优路径,解决多出口的流量均衡问题。表 1 给出了这 3 种技术建立跨域隧道的比较。

在基于 IPv6 的 SR 网络中^[16],由于 SID 直接编码成 IPv6 地址,业务流根据报文扩展头部携带的 IPv6 地址栈指定显示路径进行转发,因此,SRv6 天生就支持跨域隧道建立,无需额外协议配合实现跨域标签分发。

(3) 业务保护

传统 IP/MPLS 网络在业务保护方面存在不足。LFA^[17]和 RLFA^[18]提供了满足不同拓扑条件的无环路 FRR 保护方法,MPLS-TE FRR 需要为工作路径预先配置一条满足 QoS 需求的备份路径。这些方法不仅业务保护的场景有限,而且控制协议复杂,如 LDP FRR 需要 T-LDP 协议的支持、MPLS-TE FRR 需要 RSVP 协议支持。

SR 可满足各种网络拓扑结构的业务保护,基于 SR 的 TI-LFA^[19]可为 SR-BE 隧道提供几乎

表 1 3 种 BGP 标签分发技术建立跨域隧道的比较

BGP 标签分发	标签生成	标签分发协议	域间出口选择	可维护性
BGP-EPE	BGP peering SID 可固定分配,也可随机生成	不需要	可根据路径策略灵活选择	标签可见,方便维护
BGP-LU	远端 PE 绑定标签 SID 只能随机生成	BGP	根据 BGP 路径属性决定	标签不可见,难以维护
BGP-SR	远端 PE 绑定标签 SID 可全局规划,全网唯一	BGP	根据 BGP 路径属性决定	标签全网统一,方便维护



100%的拓扑无关 FRR 保护, TI-LFA 备份路由由 IGP 自动计算, 无需维护隧道状态信息。现以图 4 为例描述 TI-LFA 实现拓扑无关 FRR 保护。图 4 中源节点 A 发送到目的节点 B 的 IP 报文正常情况下经过 R1-R2 最短路径, 当 R1 检测到 R1-R2 间链路出现故障时, R1 无法使用 LFA 算法找到一条无环路切换路径, 也无法使用 RLFA 算法找到一条备用路径, 因为 P 空间和 Q 空间无重叠空间。但 R1 可以使用 TI-LFA 算法找到 P 空间和 Q 空间最靠近的两个节点 R4 和 R5, 构建拓扑收敛后经由 R4-R5-R2 的最短备份路径, 转发表 (FIB) 预先自动生成备份路径标签栈 {Node SID: R4, Adj SID: R4-R5, Node SID: R5}, 在检测到 R1-R2 链路故障时快速切换到备份路径。

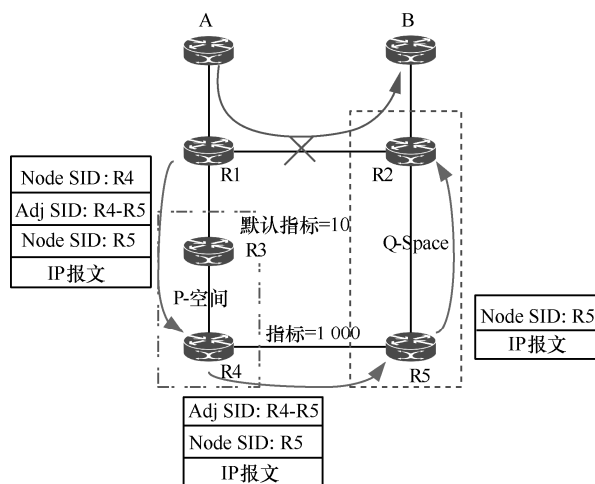


图 4 TI-LFA 实现拓扑无关 FRR 保护示意图

在 SR-TE 隧道保护中, 头节点可为主 LSP 配置一条以一串 SID 指示的热备份 LSP, 也可基于 IGP 最短路径自动生成 BE 隧道。当配置的以太网 OAM 或 BFD 等快速检测机制检测到端到端 TE 隧道故障时, 可实现 50 ms 内的故障快速切换。在 SR-TE 隧道保护中, 参考文献[20]还提出了一种基于 FRR 的节点保护机制, 本地修复节点 (point of local repair, PLR) 可为节点或链路故障自动生成备份路径。

本文还对主流厂商 IP RAN 设备支持 SR 技术

进行了实验验证, 测试项目包括 SR 与 LDP 共存、SR 与 LDP 互操作、SR-BE/TE 隧道建立、SR 的 TI-LFA 保护等, 华为、中兴设备都能够得到很好的支持。

3.2 EVPN 实现 L2/3 VPN 统一控制

RFC7432 规定了基于以太网二层 VPN (EVPN), 最初是为了解决 VPLS 存在的多归属接入、负载均衡、转发面的 MAC 地址学习、虚拟机迁移、拓扑收敛慢等局限性^[21]。随着云计算的快速发展, 云数据中心网络架构也经历了重大变革, 基于 VxLAN 的 overlay 技术^[22]广泛部署在多租户云数据中心及数据中心互联 (DCI) 等应用场景。随着跨子网租户互通需求的增加, VxLAN 还需要提供三层路由功能^[23]。需求的变化同时也赋予 EVPN 新的生命力, 作为一种不断发展的二层/三层 VPN 控制协议, EVPN 已经成为 VxLAN 数据中心的统一控制平面。

EVPN 使用 MP-BGP 扩展协议, 地址族标识 (AFI) 为 25, 代表 L2VPN, 子地址族 (SAFI) 为 70, 代表 EVPN。EVPN 定义了 5 种路由类型, 可实现 L2VPN (VPWS、VPLS、VxLAN)、L3VPN (VPNv4、VPNv6) 统一承载控制, 极大地简化了不同 VPN 实现所需控制协议。5 种路由类型的作用见表 2。

面向 5G 承载 IP RAN 需要实现 5G/4G/政企专线业务的融合承载, 在同一张网络上需要同时承载端到端政企专线 VPWS、4G 基站业务 (PW+L3 VPN)、5G 三层到边缘的层次化 VPN (HVPN)、VPNv4 和 VPNv6 等多种不同业务。随着 5G 核心网下沉以及 MEC 的引入, 还存在不同层级 DC 之间的互联需要, 这要求 IP RAN 能够提供非常灵活的网络连接。传统 IP RAN 中由于不同 VPN 业务实现需要不同的承载控制协议, 使得网络控制及设备配置变得非常复杂。EVPN 作为多种 L2/L3 VPN 业务的统一控制协议, 极大地简化了网络。

本文在实验室也验证了主流厂商设备以 EVPN 作

表 2 5种路由类型的作用

路由类型	名称	作用
RT-1	以太网自动发现路由 (ethernet auto-discovery route)	CE 多归属场景下通告以太网段标识 (ethernet segment identifier, ESI), 可用于 L2VPN 的负载均衡、路径冗余备份、快速收敛
RT-2	MAC/IP 通告路由 (MAC/IP advertisement route)	MAC、ARP 及主机路由信息的通告, 可用于 VPLS、VxLAN 等场景
RT-3	泛多播以太网标签路由 (inclusive multicast Ethernet tag route)	通告泛多播以太网路由, 主要用于未知单播、多播及广播报文处理
RT-4	以太网段路由 (ethernet segment route)	通告 ESI 及源路由器 IP 地址信息, 用于 CE 多归属场景下指定转发器 (designated forwarder, DF) 选举
RT-5	IP 地址前缀路由 (IP prefix route)	通告 IP 地址前缀信息, 可用于 VxLAN 子网间路由、L3VPN

为多种 L2/L3 VPN 业务的统一控制协议在简化网络方面所表现出的巨大优越性。

3.3 基于 FlexE 网络切片

5G IP RAN 需要满足 eMBB、uRLLC、mMTC 等多业务差异化承载需求, 这对 IP RAN 的网络切片提出了现实要求。常规如 VPN、QoS 等软隔离手段难以为低时延业务提供确定的时延和抖动性能指标, 基于 FlexE 网络的硬隔离切片以太网成为目前研究的热点。

FlexE 技术^[24]通过绑定一路或多路标准 100GE、200GE、400GE 以太网端口, 并在此基础上以 66 bit 编码块为基本单位基于时隙复用实现通道化的以太网 MAC 技术。当前 OIF 规定客户

业务承载通道的最小带宽颗粒为 5 Gbit/s。FlexE 接口通过 FlexE 垫层 (FlexE shim) 支持多链路捆绑以及通道化的 MAC 子速率功能。FlexE 垫层位于 IEEE 802.3 以太网标准 PCS 子层中。每个 FlexE 客户信息都以 66 bit 编码的比特流在发送端的 FlexE 垫层进行时分复用, 如图 5 所示, 实现各 FlexE 客户业务的通道化承载, 在接收端的 FlexE 垫层实现各 FlexE 客户信息的解复用。OIF 定义的 FlexE 开销帧用于 FlexE 帧的同步与 CRC 检测、时隙对应的 FlexE 客户标识、FlexE 客户增删及带宽调整、链路故障检测及 OAM 等相关功能。每个 FlexE 开销帧由 8 个 66 bit 的开销块构成, 32 个 FlexE 开销帧构成一个完整的开销复帧。每个

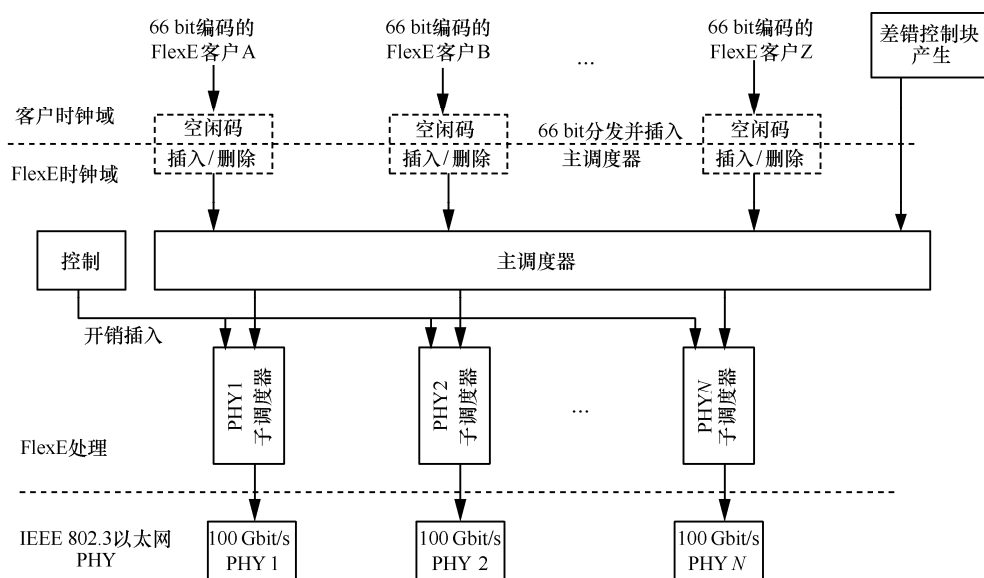


图 5 FlexE 复用功能模型



FlexE 开销块以 1 023×20 个 FlexE 帧或块为间隔周期性出现在 FlexE 帧序列中。

目前华为、中兴的新一代 IP RAN 设备已支持 FlexE 接口的商用化。FlexE 接口为低时延业务配置硬隔离的虚拟子接口，可实现带宽独占和时延保证，不受流量突发影响，业务带宽动态调整不丢失分组。为满足某些 uRLLC 业务对时延更加严苛的要求，设备商开始研发同时支持分组交换和电路交换的双平面交换引擎，为超低时延业务配置端到端 TDM 电路。由于电路交叉引擎无需对客户报文进行 MAC 层以上的任何处理解析，只需在 FlexE 垫层对 66 bit 编码块实现基于时隙的交叉，即可实现 1~10 μs 的单跳转发时延。

3.4 IP RAN 新技术试验验证

本文搭建了如图 6 所示的测试拓扑环境。4G、5G 基站接入由 A 设备组成的 10GE/25GE 接入环，B 设备与 ER 设备之间采用 50GE/100GE 端口互联，被测试设备的 50GE/100GE 端口板卡支持 FlexE 功能。接入层和城域汇聚/核心层采用不同 IGP 进程，B 设备分属不同的 IGP 域，接入层启用 OSPF，汇聚/核心层启用 ISIS。同时，全网启用 MP-BGP，B 设备充当接入层 RR，汇聚 ER 充当汇聚/核心 RR，B 和 ER 互为 BGP 客户。

本次实验室测试验证了华为、中兴设备对 SR、EVPN 及 FlexE 新技术的支持情况。测试结果见表 3。

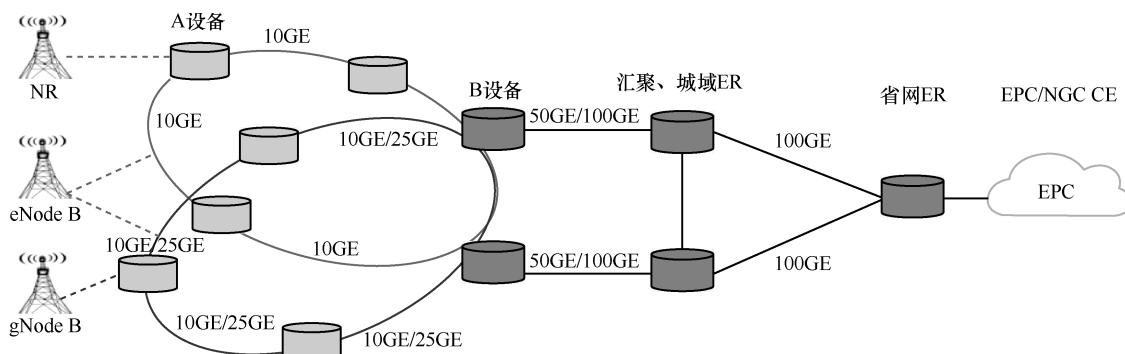


图 6 新技术验证测试拓扑

表 3 设备支持新技术的测试验证结果

测试项目	测试结果
SR-BE、SR-TE	设备支持 10 层标签栈能力；支持严格 SR-TE 和松散 SR-TE；支持标签粘连
OAM (SR-ping、SR-trace、SR-BFD)	支持
LDP 与 SR 共存	支持设备同时开启 LDP、SR
LDP 与 SR 互操作	支持 LDP ↔ SR 互操作
PW+L3VPN	支持 PW+L3VPN over LDP 和 PW+L3VPN over SR-BE/TE
层次化 HOVPN	支持 HOVPN over LDP、HOVPN over SR-BE/TE，支持 3 层到边缘
6VPE	支持 L3VPN over LDP/SR-BE/SR-TE，支持 PW+L3VPN 和 HOVPN
SR-BE TI-LFA FRR	支持
SR-TE 热备份	支持
EVPN	支持 L2VPN (VPWS、VPLS)、L3VPN，支持 L2/3 VPN 统一控制，支持 ARP 代理，支持 single-active 冗余及 all-active 负载均衡
FlexE	支持 50GE/100GE FlexE 接口通道化子速率，支持 FlexE 客户端带宽动态调整，支持 L2/3 VPN over LDP/SR over FlexE

3.5 SDN 实现网络智能

5G 网络架构演进以及多业务差异化承载需求推动 5G 承载的 IP RAN 架构的变化, SR、EVPN、FlexE 等新技术的引入进一步提升了 IP RAN 能力。同时也对 IP RAN 的管控提出了诸多新的需求。运营商需要借助 SDN 智能技术来设法降低面向 5G 承载的 IP RAN CAPEX 和 OPEX, 快速部署业务, 抢占市场和客户。基于 SDN 的 IP RAN 管控系统(如图 7 所示)实现网络智能主要体现在以下几个方面。

(1) 业务部署自动化

用户通过编排器定义业务模板和业务策略, 完成业务上线与开通、业务变更、业务质量保障、业务关闭与下线等整个生命周期的管理。通过调用 SDN 控制器或 EMS 原子能力服务, 获取网络资源, 实现业务配置, 并通过北向接口下发给 SDN 控制器, SDN 控制器把业务模型翻译成设备配置模型, 通过南向接口支持 NetConf/YANG 向设备下发配置。SDN 控制器可基于业务 SLA 参数自动创建端到端隧道, 或人工指定相应隧道。业务部署后, 运维人员可配置业务 BOD、性能监测等工具, 基于性能监测数据进行路径调优, 实现业务质量保障的闭环管理。

(2) 智能化路径计算

SDN 控制器基于南向 BGP-LS 接口收集全网拓扑信息和流量工程信息、节点和链路的 SID 信

息, 根据链路代价、带宽、时延、颜色、SRLG 等多种约束条件, 实现域内或跨域路径计算和流量优化。并通过支持 PECP 接口向头节点下发 SR-TE 路径。智能化路径计算还支持跨域多出口流量工程和负载均衡。

(3) 网络切片

IP RAN 不仅要满足面向 5G 的 eMBB、uRLLC、mMTC 三大典型业务的差异化承载要求, 还要实现 4G 业务、政企专线业务的融合承载。承载网需要不同切片提供不同的网络功能和性能, 以满足不同业务的 QoS 要求、隔离性和可靠性要求。采用手工规划设计切片网络不仅业务提供速度慢, 而且网络资源使用效率难以达到最优。基于 SDN 管控系统应能支持切片网络自动化计算和部署, 支持网络切片的按需定制, 并能对切片网络进行智能运维管理。

(4) 智慧化运维

随着 5G 基站数量增长, 5G 承载网元数量也大幅增加。网络规模的扩张叠加多样化业务部署的复杂性使得网络的运维面临巨大挑战。通过引入 AI 等智能化技术, 对网络配置、性能监测、流量流向、告警事件等进行统一管理和分析, 以实现流量预测、网络优化、故障快速诊断和排障等智慧化运维功能。

4 结束语

5G 需要满足 eMBB、uRLLC、mMTC 三大应

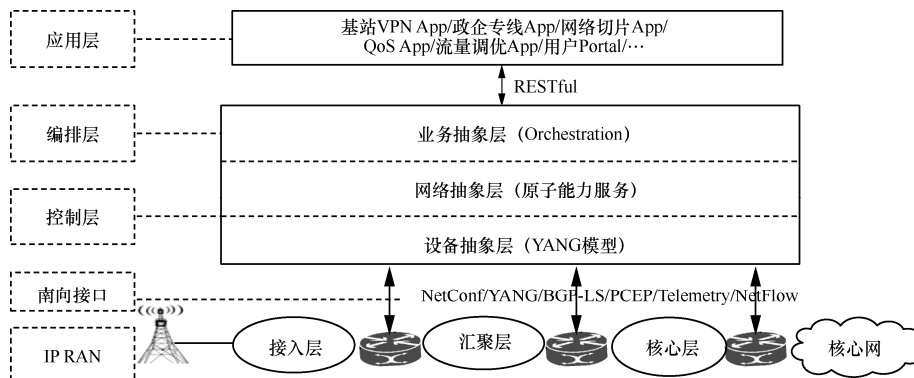


图7 基于SDN的IP RAN管控系统



用场景,驱动着 5G 无线接入网将向云化 RAN 部署,5G 核心网将向服务化架构演进,实现基于 SDN/NFV 的架构重构。与之相适应,5G 也将全面推动 IP RAN 承载架构的演进与承载技术的发展。面向 5G 的 IP RAN 将是一张多业务、多网络的融合承载网,需要 IP RAN 在“大带宽、低时延、灵活连接、网络切片”等各个方面进行能力提升。基于 PAM4 技术的新一代大带宽低成本以太网基础设施构建大容量 5G 承载的 IP RAN 已成为业界共识,产业链日趋成熟。在 IP RAN 引入 SR+EVPN 技术可以极大地简化控制协议,增强网络连接的灵活性;通过引入 FlexE 低时延分片技术降低网络传输时延,为超低时延业务提供确定的时延和时延抖动保证。与此同时,网络规模的扩张叠加多样化业务部署的复杂性使网络的运维面临着巨大挑战,运营商需要采用 SDN 技术来设法降低面向 5G 承载的 IP RAN CAPEX 和 OPEX。

根据 5G 业务发展情况,IP RAN 近期主要承载 eMBB,包括传统 LTE 业务延续以及高清视频、VR/AR 等业务。可充分利用现有 IP RAN 的网络能力基础,满足 4G/5G 综合承载要求。通过对现有网络设备进行升级或替换,提升网络带宽能力。GE/10GE 接入环视 5G 流量增长趋势可按需升级到 10GE/25GE 接入环,汇聚/核心层可按需升级到 $N \times 50\text{GE}/100\text{GE}$ 带宽。在现网积极开展 SR 和 EVPN 新技术试验,部署 SDN 智能化运维系统。到 5G 业务发展的中远期,IP RAN 承载网的演进目标将满足 eMBB、mMTC、uRLLC 等多业务场景的融合承载。接入城区流量密集区域将按需演进到 25GE/50GE 环,IP RAN 将全面部署 SR 和 EVPN,实现更加灵活的连接能力。承载网需要实现基于 VPN+QoS 软切片或基于 FlexE 技术的硬切片的网络分片能力,满足不同业务的网络性能要求及多种不同垂直行业应用。通过部署基于 SDN 的管控系统打造一张“业务部署自动化、路径计算智能化、网络切片自动化、网络运

维智慧化”的 IP RAN 融合承载网。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR38.913 V0.3.0[S]. 2016.
- [2] 中国电信. 5G 白皮书[R]. 2018.
China Telecom. 5G white paper[R]. 2018.
- [3] 3GPP. Study on new radio access technology; radio access architecture and interfaces (Release14): TR38.801 V14.0.0[S]. 2017.
- [4] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS23.501 V0.4.0[S]. 2017.
- [5] 3GPP. Study on architecture for next generation system (Release 14): TR23.799, V1.0.1[S]. 2016.
- [6] 王庆杨, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.
WANG Q Y, XIE P R, XIONG S K, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [7] ETSI. Mobile edge computing (MEC); technical requirements: GS MEC 002 V1.1.1[S]. 2016.
- [8] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义, 等. 5G MEC 融合架构及部署策略[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 109-117.
ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y, et al. 5G mobile/multi-access edge computing integrated architecture and deployment strategy[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 109-117.
- [9] 朱梅冬, 陆建鑫. PAM4 技术在光通信应用中的系统分析[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(4): 37-41.
ZHU M D, LU J X. System analysis of PAM4 technology in optical communication applications[J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(4): 37-41.
- [10] PREVIDI S, RJSROB S, HORNEFFER M, et al. SPRING problem statement and requirements, IETF draft, work in progress[S]. 2014,
- [11] FILSFILS C. Segment routing architecture, IETF draft, work in progress[S]. 2018.
- [12] 何晓明, 卢泉, 邢亮. 分段路由网络研究及其在流量工程中的应用[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 168-194.
HE X M, LU Q, XING L. Study on segment routing network and its application in traffic engineering[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 168-194.
- [13] PREVIDI S, TALAULIKAR K, FILSFILS C, et al. Segment routing egress peer engineering BGP-LS extensions, IETF draft, work in progress[S]. 2019.
- [14] ROSEN E. Using BGP to bind MPLS labels to address prefixes:

- RFC8277[S]. 2017.
- [15] PATEL K, PREVIDI S, FILSFILS C, et al. Segment routing prefix SID extensions for BGP, IETF draft, work in progress[S]. 2015.
- [16] PREVIDI S, FILSFILS C, FIELD B, et al. IPv6 segment routing header (SRH), IETF draft, work in progress[S]. 2015.
- [17] ATLAS A, ZININ A. Basic specification for IP fast reroute: loop-free alternates: RFC7490 [S]. 2008.
- [18] BRYANT S, FILSFILS C, PREVIDI S, et al. Remote loop-free alternate (LFA) fast reroute (FRR): RFC7490[S]. 2015.
- [19] BASHANDY A, FILSFILS C, DECRAENE B, et al. Topology independent fast reroute using segment routing, IETF draft, work in progress[S]. 2018.
- [20] HEGDE S, BOWERS C. Node protection for SR-TE paths, IETF draft, work in progress[S]. 2016.
- [21] SAJASSI A, AGGARWAL R, BITAR N, et al. BGP MPLS-based Ethernet VPN: RFC7432[S]. 2015.
- [22] SAJASSI A, SALAM S, PATEL K, et al. A network virtualization overlay solution using EVPN, IETF draft, work in progress[S]. 2012.
- [23] RABADAN J, HENDERICKX W, DRAKE J, et al. IP prefix

advertisement in EVPN, IETF draft, work in progress[S]. 2018.

- [24] OIF. Flex Ethernet implementation agreement: OIF-FlexE IA-2.0[S]. 2018.

[作者简介]



何晓明（1968—），男，博士，中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院高级工程师，主要从事数据网络研究和支撑工作，主要研究方向为网络架构、协议、流量工程、SDN/NFV等。

岳萍（1984—），女，中国电信集团有限公司工程师，主要从事数据网络方面的研究工作。

卢泉（1969—），女，中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院高级工程师，主要从事数据网络方面的研究工作。

尹远阳（1986—），男，中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院工程师，主要从事数据网络研究和支撑工作。