



面向 5G STN 承载网络 FlexE 切片技术

尹远阳¹, 林贵东², 杨广铭¹, 卢泉¹, 蓝双凤¹

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 广东 广州 510630;

2. 中国电信股份有限公司广东分公司, 广东 广州 510180)

摘要: 网络新技术的发展为 5G 注入了新的活力, 针对 5G 新定制化网络应用领域及需求, 如何构建一张具备灵活切片能力的移动承载网, 成为 5G 承载网建设重中之重。从 FlexE 技术架构及应用场景等方面进行了深入研究与探索, 详细介绍了 FlexE 接口技术原理与应用, 并与 FlexE 电路交叉技术进行了对比分析, 创新性地提出了基于 IP/MPLS 机制结合 FlexE 接口技术的 STN 承载网切片架构, 并给出了 5G STN 承载网采用 FlexE 接口部署网络切片发展方向与建议, 满足推进 5G STN 承载网切片大规模商用部署。

关键词: 5G; STN; FlexE 技术; 网络切片

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021068

FlexE slicing technology for STN bearer network to 5G

YIN Yuanyang¹, LIN Guidong², YANG Guangming¹, LU Quan¹, LAN Shuangfeng¹

1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

2. Guangdong Branch of China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510180, China

Abstract: The development of new network technology injects new vitality into the new generation of communication. In the 5G era, how to build a bearing network with slicing capability has become the top priority of 5G bearing network construction according to the new customized network application fields and requirements. In-depth research and exploration was made from the aspects of FlexE technology architecture and application scenarios, and a comparative analysis was made with FlexE circuit crossing technology. The STN bearer network slice architecture based on IP / MPLS mechanism with FlexE interface technology was conceived. 5G STN bearer network was deployed with FlexE and the development direction were proposed. It can meet the requirements of large-scale commercial deployment of 5G STN network slice.

Key words: 5G, smart transport network, Flex Ethernet technology, network slice

1 引言

随着 4G 移动通信技术的引入, 在线视频、智能互联等新业务深刻地改变了人们的生活。

而当前 VR/AR、4K/8K 高清视频直播等的涌现, 工业 4.0 及物联网的广泛发展, 对移动通信技术提出了新的需求及挑战。ITU 定义了 5G 的新应用领域及需求, 其中增强型移动宽带

(enhance mobile broadband, eMBB) 通过更高带宽和更低时延继续提升人类的视觉体验; 大连接物联网 (massive machine type communication, mMTC) 针对万物互联的垂直行业, 对接入数量和能效有很高的要求; 超可靠低时延通信 (ultra-reliable and low-latency communication, uRLLC) 针对特殊垂直行业, 例如工业自动化、远程医疗、智能电网等“高可靠性”和“低时延”的业务需求。这些 5G 新业务的出现, 尤其是 eMBB、uRLLC 等都对于其中承载网络提供的时延、带宽等可度量的指标提出了新的要求, 进一步地, 对于使能这些指标保证的承载网络技术, 也引起业界的关注及思考, 承载网络正面临着前所未有的多样化需求与革新挑战。

3GPP TS22.104 主要定义针对垂直行业的沉浸式应用 (cyber-physical control application) 的服务要求, 这其中明确定义了需要端到端的有界时延 (bounded latency) 来使能这些基于时延作为度量指标或者直接影响体验效果的新业务。这种有界时延保障的需求也充分体现了 5G 承载网络从传统单纯的带宽逐渐转移到对业务体验和服务质量要求的保障要求上, 从关注连接 (connection) 转向关注体验 (experience), 承载网络建设思路也向业务和体验驱动转变, QoE 已经成为运营商网络的关键指标, 给业务提供时延及带宽的 SLA 可保障承载方案成为业界关注的焦点。

STN (smart transport network) 作为移动承载网络的核心, 在统计复用、差异化服务特性等方面支持了 4G 时代业务承载, 实现了最优的 CAPEX 和 OPEX。中国电信早在 2018 年就开始对 5G 承载网架构、技术标准进行研究, 经过近 3 年的充分论证和实验室测试, 最终选择了 STN 作为 4G/5G 融合承载技术标准。在当前 5G 时代, eMBB、uRLLC 等多种不同时延、带宽保障需求

的业务在统一的 STN 承载网上传输时, 如何实现不同业务的保障及隔离成为承载网需要解决的关键问题, 网络分片的概念也应运而生。5G 承载网上如何实现数据面网络分片, 针对特定业务带宽、资源分配及保障, 最终实现无阻塞、零丢包、有界时延及低时延保障, 也是业界一直在思考及探索的问题。尤其是如何突破传统概念上认为的 IP 网络因为拥塞产生的时延不确定问题, 成为 5G 承载网络的巨大挑战及关键技术。其中, 灵活以太 (FlexE) 技术在最近几年受到业界的关注, 本文从 FlexE 技术背景、架构及在 STN 承载网络上的系统应用方面进行了研究和探索, 探讨了作为 5G STN 承载网切片创新技术方案。

2 FlexE 关键技术研究与分析

2.1 FlexE 技术原理

FlexE 技术由光互联论坛 (Optical Internet-working Forum, OIF) 定义, 是基于 IEEE 802.3 定义的高速 Ethernet 接口, 通过 Ethernet MAC 层与 PHY 层解耦而实现的低成本、高可靠、可动态配置的电信级接口技术。该技术利用了业界最广泛、最强大的 Ethernet 生态系统, 并且契合了视频、云计算以及 5G 等业务的发展需求, 自 2015 年提出以来, 受到业界广泛关注。FlexE 技术通过在标准的 Ethernet 架构基础上, 引入 FlexE shim 层实现了 Ethernet MAC 与 PHY 层的解耦, 从而实现了灵活的速率匹配。FlexE 技术与 Ethernet 标准关系及 FlexE shim 功能如图 1 所示。

灵活以太基于 client/group 架构来定义, 如图 2 所示, 可以支持任意多个不同子接口 (FlexE client) 在任意一组 PHY (FlexE group) 上的映射和传输, 从而实现捆绑、通道化及子速率的功能。具体如下。

- FlexE client: 对应于网络的各种用户接口, 与现有 IP/Ethernet 网络中的传统业务接口

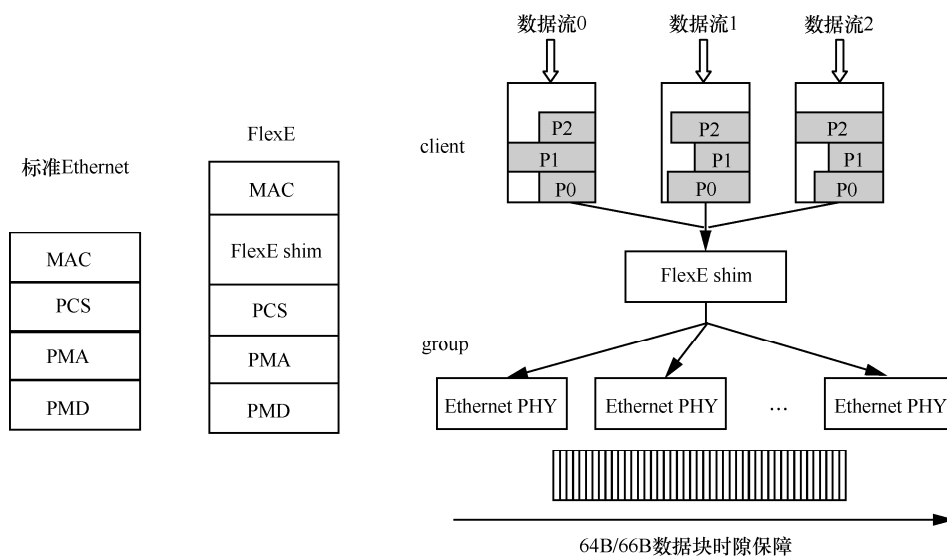


图1 FlexE技术与Ethernet标准关系及FlexE shim功能

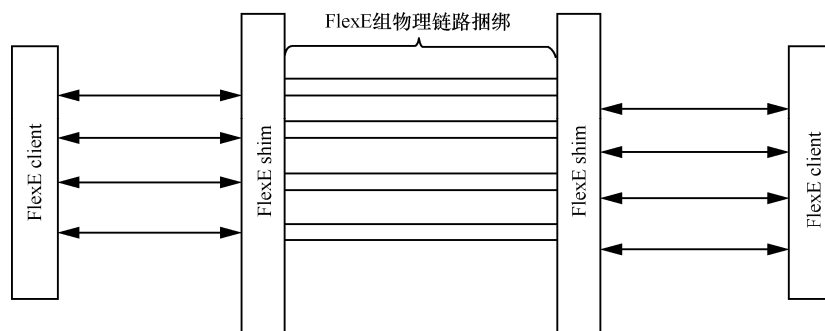


图2 FlexE通用架构

一致。FlexE client 可根据带宽需求灵活配置，支持各种速率的以太网 MAC 数据（如 10 Gbit/s、40 Gbit/s、 $n \times 25$ Gbit/s 数据流，甚至非标准速率数据流），并通过 64B/66B 编码方式将数据流传递至 FlexE shim 层。

- FlexE shim: 作为插入传统以太网架构的 MAC 与 PHY（PCS 子层）中间的一个额外逻辑层，通过基于 calendar 的 slot 分发机制实现 FlexE 技术的核心架构。
- group: 本质上就是 IEEE 802.3 标准定义的各种以太网 PHY 层。由于重用了现有 IEEE 802.3 定义的以太网技术，FlexE 架构得以在现有以太网 MAC/PHY 基础上进一步增强。

以 FlexE 作为点对点连接场景的物理层接口

为例，多路以太网 PHY 组合在一起成为 FlexE group，并承载通过 FlexE shim 分发、映射过来的一路或者多路 FlexE client 数据流。

FlexE 的核心功能通过 FlexE shim 层实现，它可以把 FlexE group 中的每个 100GE PHY 划分为 20 个 slot（时隙）的数据承载通道，每个 PHY 所对应的这一组 slot 被称为一个 sub-calendar，其中每个 slot 所对应的带宽为 5 Gbit/s。FlexE client 原始数据流中的以太网帧以 block 原子数据块（为 64B/66B 编码的数据块）为单位进行切分，这些原子数据块可以通过 FlexE shim 实现在 FlexE group 中的多个 PHY 与时隙之间的分发。

按照 OIF FlexE 2.0 标准，每个 FlexE client

的数据流带宽可以设置为 10 Gbit/s、40 Gbit/s 或者 $m \times 25$ Gbit/s。由于 FlexE group 的 100 GE PHY 中每个 slot 数据承载通道的带宽为 5 Gbit/s 粒度, FlexE client 理论上也可以按照 5 Gbit/s 的速率颗粒度进行任意数量的组合设置, 支持更加灵活的多速率承载。

2.2 FlexE 应用

根据 FlexE 的技术特点, client 可向上层应用提供各种灵活的带宽而不拘泥于物理 PHY 带宽。根据 client 与 group 的映射关系, FlexE 可提供 3 种主要功能, 如图 3 所示。

- 捆绑 (bonding): 多路 PHY 一起工作, 支持更高速率。如 8 路 100 GE PHY 捆绑来支持 800GE MAC 速率。
- 通道化 (channelization): 多路低速率 MAC 数据流共享一路或者多路 PHY。如最初定义在 100GE PHY 上承载 25 Gbit/s、35 Gbit/s、20 Gbit/s 与 20 Gbit/s 的四路 MAC 数据流; 随着标准逐步成熟, 可以在 100GE PHY 上承载以 5 Gbit/s 颗粒度带宽的 MAC 数据流, 1 Gbit/s 颗粒度的 MAC 数据流标准也有厂商正在推动标准立项。
- 子速率 (sub-rate): 单一低速率 MAC 数据流共享一路或者多路 PHY, 并通过特殊定义的 error control block 实现降速工作。如在 100GE PHY 上仅仅承载 50 Gbit/s MAC 数据流。

3 基于 FlexE 技术的 STN 承载网架构

灵活以太的通道化技术提供了接口级不同 FlexE client 之间的物理硬切分及相互隔离, 可以进一步与路由器数据面的可编程转发、流量管理及调度相结合, 构建满足 5G 低时延要求的端到端专用管道。这种灵活以太专用管道, 是基于硬分片隔离的通道化技术, 将一个物理以太网端口划分为多个以太网弹性硬管道。既可以支持承载网络实现独占带宽资源的保证, 又可以在每一个通道化的子接口内部采用基于 IP/MPLS 技术的流量管理机制, 实现同一分片内业务统计复用, 分片之间业务互不影响。采用基于 QoS 的报文调度成为降低网络端到端低时延的关键, QoS 技术通过流量监管、流量整形、拥塞管理、拥塞避免等基于共享缓存队列调度的机制, 实现不同业务的差分服务。这种报文调度引起的时延主要分为两部分: 队列缓存时延和调度算法执行的调度器响应时延。队列调度算法的性能直接影响时延, 调度算法通过有效性、公平性、可编程性, 成为降低报文调度时延的主要手段。层次化 QoS (hierarchical quality of service, HQoS), 是一种通过多级队列调度机制, 解决 DiffServ (区分服务) 模型下多用户多业务带宽保证的技术。通过多级调度, 可以精细区分不同用户和不同业务的流量, 提供区分的带宽管理。统计复用与硬管道隔离的区别示意图如图 4 所示。

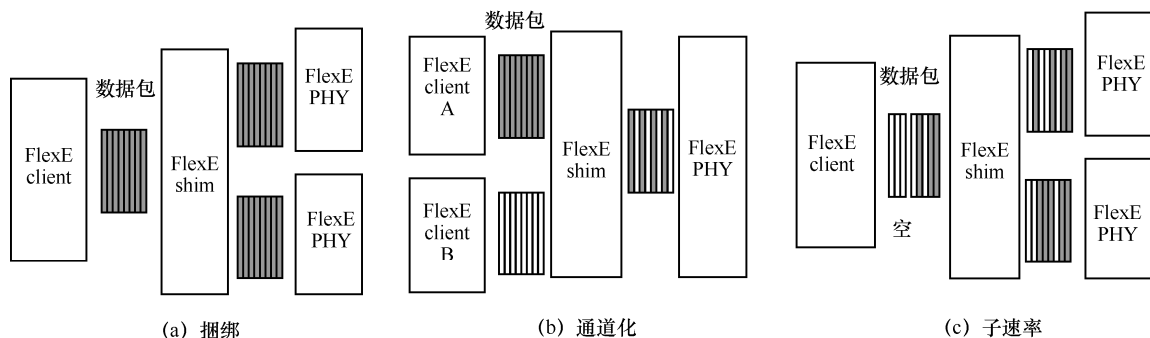


图 3 FlexE 的 3 种主要功能

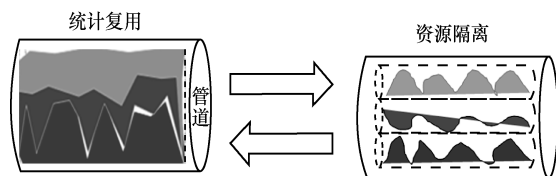


图4 统计复用与硬管道隔离的区别示意图

这种 IP/MPLS 网络基于 QoS 提供差异化 SLA 保证的调度机制,进一步与通道化的灵活以太网接口配合,在物理层可以完全消除报文传输所引起的抖动。相对于在数据平面不支持硬件隔离及 SLA 业务保证的软分片技术,可以进一步提供针对 5G 应用中对于有界时延业务的保证,达到 5G 承载的时延保证要求。基于 QoS 技术的流量调度模块,可以根据业务的 SLA 要求,为每个业务分配相应的硬件缓存资源,相当于在报文调度中为每个业务划分独立的缓存及数据通道,不同业务的数据通道之间、业务流量传输过程中,这些硬件资源完全不共享。在每个 FlexE 通道化接口对应的分片资源内部,采用 IP/MPLS 技术的流量管理技术进行缓存调度。缓存资源的独占,使得各个业务在 QoS 调度中得到硬隔离,有效避免流量突发时,出现各业务争抢缓存资源,导致业务 SLA 劣化等问题。FlexE 技术应用

于 STN 架构示意图如图 5 所示。

4 5G STN 承载网切片技术与 FlexE 电路交叉分析

业界在探讨灵活以太应用于 5G 承载网络的技术方案时,还在探讨基于 TDM 技术直接在以太网接口 L1 层实现 FlexE switch 的思路。FlexE switch 原理示意图如图 6 所示。在这种方案中,每一个转发节点中的数据报文在入口直接基于 FlexE shim 结构中定义的 64B/66B 数据块进行交叉,不再进行 STN 承载网络中灵活以太网接口 MAC 层报文恢复以及基于报文信息的 IP/MPLS 调度处理。

这种基于 TDM 机制的 FlexE switch 在每个交叉节点上的时延是确定的,包括报文在入口基于相应通道化接口带宽决定的并行化时延,64B/66B 数据块通过 switch 矩阵的时延,以 100GE 灵活以太网接口提供 1 Gbit/s 通道化为例,受不同的芯片实现方式影响,时延一般在 100~500 ns 范围。考虑 5G 多业务承载的不同需求,引入基于 TDM 交换的 FlexE 技术还需要考虑如下几个关键问题:全网基于每条业务类型对应的 FlexE 交叉时间片进

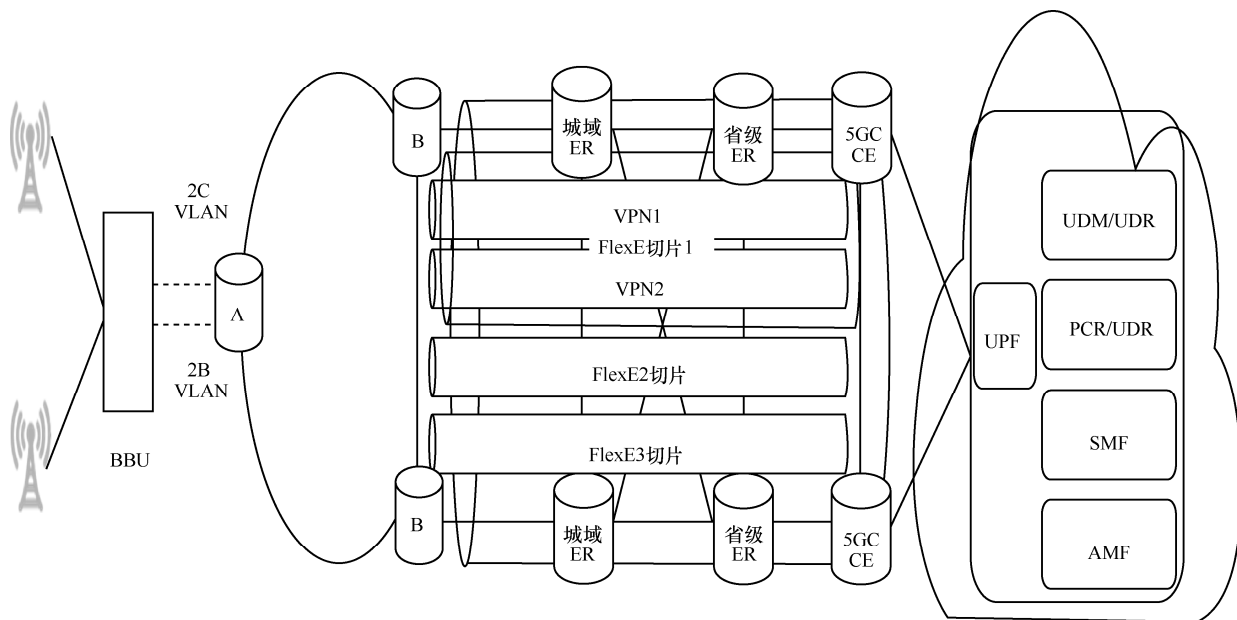


图5 FlexE 技术应用于 STN 架构示意图

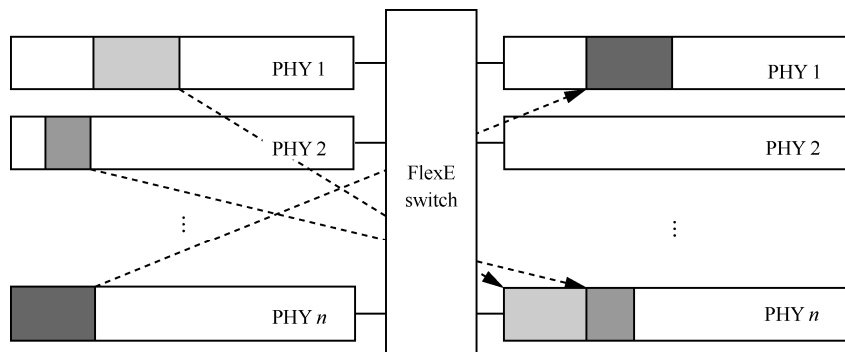


图 6 FlexE switch 原理示意图

行统一规划、调度；每条业务需要精确映射到全网时间片资源中；由于运营商网络的规模较大和海量的链接，这些规划及部署比较挑战，很多情况下存在 NP-hard 问题，学术界在这方面正在进行研究。

基于 FlexE 64B/66B 数据块的时分复用交叉 (TDM switch) 机制，等同于直通式 (cut-through) 的转发方式（不存储转发方式），由于在每一个节点不进行逐跳完整报文的校验，需要基于 E2E 链路的机制保证报文可靠的传输。如何满足 5G 承载多业务，不同带宽需要数据流的可靠传输，也是这方面需要面临的挑战，尤其是在通道化灵活以太支持小粒度接口时的大容量转发芯片设计中。

在 ITU-T G.mtn 正在开展 FlexE 接口进行通道化并在物理层建立 E2E 的 L1 层 TDM 的承载技术。目前这一技术面临两个较大的挑战：首先，为了支持承载业务，需要考虑 OAM 如何通过 FlexE 接口与更底层的 Ethernet PHY 进行传输。当前正在进行如何建立起合适的 OAM 机制的讨论中，包括利用 FlexE 接口开销帧中的段层管理通道 (section management channel) 或者采用额外的 1~3 个 66 bit 数据码块进行标识。其中，第一个码块被编码为有序集 (ordered set)，该有序集码块包含 24 bit 的 OAM 信息。并进一步考虑扩展第二块和第三块 OAM 码块，

则后续的码块均为 64 bit 的 OAM 信息。这一机制的 OAM 码块虽然符合 64B/66B 编码格式，但已经超出 IEEE 802.3 标准定义的编码表，这使得 G.mtn OAM 码块与传统以太接口的不兼容以至于无法对接。其次，在 G.mtn 中处于对接的两端需要额外的空闲码块增删机制以调整适应每个 G.mtn 段层的时钟速率偏差，这一种处理方式也是目前传统以太接口不支持的。G.mtn 的空闲码块增删是基于 64B/66B 数据块进行。而传统以太网接口是基于空闲控制字段 (idle character) 进行增删的。这也是 G.mtn 需要进一步去脱离本生的灵活以太技术去额外定义。G.mtn 成功应用于 5G 承载网络仍需要大量技术研究和标准化工作。

5G 承载网络的多业务灵活组网，要求逐节点的进行基于 IP/MPLS 报文信息的转发、SLA 保证业务处理等。因此，一旦基于 FlexE switch 的 TDM 机制需要在每一个节点恢复报文进行 L2/L3 层的转发及流量调度处理，则需要采用本文探讨的 5G STN 承载网络切片创新技术：基于 IP/MPLS 机制以及结合“通道化灵活以太接口”的架构才能满足要求。

5 结束语

中国电信针对 IP/MPLS 网络中提供 SLA 可保障的业务承载已经进行了完善及全面的研究和



分析,并进一步应用于 4G/5G 融合的承载网络中。IETF 起草了很多有关保证业务的服务模型和机制。其中比较常见的有:综合服务(简称 IntServ)模型、区分服务(简称 DiffServ)模型。IntServ 通过 RSVP 信令机制提供端到端的 QoS 保证,特定应用在传输报文前先向网络提出带宽、时延等服务申请,每个网络节点视当前资源使用状况为其分配资源,并监视应用连接每条流的状态。如果请求不符合要求节点将发送一个差错信息给接收端,并且中断信令的处理过程。如果请求被接受,就按照约定服务水平为该业务分配链路带宽和缓冲区空间。承载网络在传送业务报文过程中执行报文的分类、流量监管、排队调度等。这种体系能够明确区分并保证每一个业务流的服务质量,为网络提供最细粒度化的服务质量区分。RFC 2212 进一步定义了有保障的服务(guaranteed service),对带宽、时延、丢包率提供定量的要求和质量保证措施。这些服务模型由于规避了传送过程中的拥塞及冲突,可以满足时延敏感业务的承载。DiffServ 模型是一种多服务模型,根据每个报文携带的优先级将网络上传输的业务分成不同的业务流,通过逐跳行为(PHB)为每种业务提供差分服务。业界在 IEEE/IETF 标准中已经在基于这些思想进行 5G 承载技术方案的讨论和制定,并且充分论证了基于 IP/MPLS 的创新架构及机制可以达到等同于 TDM 网络的最差时延上界,这也是 STN 承载技术的研究成果体现。

综上所述,基于支持 5G 多业务差异化服务的 SLA 保障机制与 FlexE 切片技术结合是中国电信 STN 智能承载网在提供低时延及业务保证的关键技术方案。通过基于 IP/MPLS 架构上的进一步精细独立缓存资源,物理端口基于时隙切片,两者灵活组合实现业务流量硬隔离,做到业务从承载网络入口到出口的端到端 SLA

保障,是进一步满足 4G/5G 融合承载关键网络技术。

参考文献:

- [1] 孙嘉琪,杨广铭,尹远阳. 5G 承载网演进方案探讨[J]. 移动通信, 2018(1): 1-6.
SUN J Q, YANG G M, YIN Y Y. Discussion on evolution schemes of 5G carrying network[J]. Mobile Communications, 2018(1): 1-6.
- [2] 李聪. 5G 承载网络架构及部署场景[J]. 移动通信, 2018(4): 17-24.
LI C. Discussion on architecture and deployment scenario of 5G bearing networks[J]. Mobile Communications, 2018(4): 17-24.
- [3] 方昆. 5G 承载大连接解决方案: Segment Routing 研究[J]. 通讯世界, 2018(1): 58-59.
FANG K. 5G bearer large connection solution: research on segment routing[J]. Communication World, 2018(1): 58-59.
- [4] 李友柯,杨锦清. 5G 承载网络架构和关键技术[C]//2019 年建筑科技与管理学术交流会议论文集. 2019: 156-158.
LI Y K, YANG J Q. 5G bearer network architecture and key technologies[C]//Proceedings of 2019 Architecture Technology and Management Conference of China. 2019: 156-158.
- [5] IA Flex Ethernet 2.1 implementation agreement[S]. 2019.
- [6] 佚名. 中国电信 2018 建 5G 生态推智能转型[J]. 通信世界, 2018, 792(34): 27-28.
Anonymous. China Telecom will build 5G in 2018 to promote intelligent transformation[J]. Communication World, 2018, 792(34): 27-28.
- [7] 潘锋. 探究 5G 移动通信技术下传输未来发展趋势[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(6): 138-139.
PAN F. Exploring the future development trend of 5G mobile communication technology[J]. China Computer & Communication, 2018(6): 138-139.
- [8] 欧阳春波,李春荣,胡永健,等. 基于 FlexE 的承载网络分片隔离技术研究和应用[J]. 电信技术, 2018(12): 12-19.
OUYANG C B, LI C R, HU Y J, et al. Research and application of partition isolation technology of bearer network based on FlexE[J]. Telecommunications Technology, 2018(12): 12-19.

- [9] 马培勇, 吴伟, 张文强, 等. 5G 承载网关键技术及发展[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 122-130.

MA P Y, WU W, ZHANG W Q, et al. Key technologies and development of 5G bearer network[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 122-130.

[作者简介]



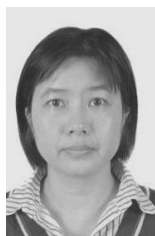
尹远阳 (1986-), 男, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要从事 IP 网络技术研究和 5G STN 承载网技术、切片网络应用研究等方面的工作。



林贵东 (1976-), 男, 中国电信股份有限公司广东分公司高级工程师, 主要研究方向为 IP RAN/STN 网络维护管理、新型城域网网络架构优化。



杨广铭 (1974-), 男, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要从事 IP 技术研究、5G 网络技术研究等方面的工作。



卢泉 (1969-), 女, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要从事 IP 技术研究方面的工作。



蓝双凤 (1992-), 女, 中国电信股份有限公司研究院助理工程师, 主要研究方向为 IP 网络技术。