



面向大规模增强确定性网络架构及验证

徐军¹, 刘爱华², 孔国权¹, 熊泉²

(1. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 浙江 温州 325000;

2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518052)

摘要: 确定性网络相比传统 IP 网络的“尽力而为”服务提供确定性服务质量保证, 满足日益增长差异化的 IP 业务承载要求。在以太网局域和 IP 限制域网络, IEEE 和 IETF 国际标准组织分别成立了时间敏感网络和确定性网络工作组, 并发布了系列标准。目前, 产业界已经开展面向大规模确定性网络的研究, 已经有共识需要对确定性网络技术进行必要的增强, 发展新的增强确定性网络架构。在 IETF 确定性网络架构基础上提出了一种三维增强确定性网络架构, 并基于该架构研制的原型样机进行了测试验证, 验证结果显示, 该架构满足大规模确定性网络的需求并具备很好的兼容性。

关键词: 增强确定性网络; 增强确定性网络架构; 增强确定性网络验证

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024008

Architecture and verification of enhanced deterministic networking oriented large-scale

XU Jun¹, LIU Aihua², KONG Guoquan¹, XIONG Quan²

1. Wenzhou Railway and Rail Transit Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 518052, China

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518052, China

Abstract: Comparison to the traditional “best-effort” QoS of IP-based network, deterministic networking had provided guaranteed QoS capabilities catering the requirements of differentiated increasing IP-based services. In the local Ethernet network and limited domain IP network, IEEE and IETF had approved the time-sensitive networking and deterministic working groups, which had published series standards. At present, the large-scale deterministic networking research has been carried out in the industry. There has being a consensus that the deterministic networking technology needs to be enhanced, and a new enhanced deterministic networking architecture needs to be developed. A three-dimension enhanced networking architecture was proposed, and the prototype devices verification based the architecture were provided. The results of verification show that it can meet the large-scale deterministic requirements with the well compatibilites for existed IP network.

Key words: enhanced deterministic networking, architecture of enhanced deterministic networking, verification of enhanced deterministic networking

0 引言

随着网络逐步成为与社会发展、人民生活日益密切相关的新型数字基础设施,越来越多的行业应用通过数字化转型承载到网络基础设施上,规模逐步增大的行业应用给基础网络设施带来差异化明显的服务质量 (quality of service, QoS) 的需求。根据开放系统互联 (open system interconnection, OSI) 网络分层设计原则,数字化业务选择 IP 建立端到端的网络连接。由于传统 IP 网络基于“尽力而为”转发模式,其架构难以满足业务差异化 QoS 的要求,尤其对于需要保证丢包率、时延和抖动的“确定性”业务的 QoS 要求^[1-2]。当前,针对以太 (Ethernet) 局域网和限制域 (limited domain) IP 网络^[3],电气与电子工程师学会 (IEEE) 和国际互联网工程任务组 (IETF) 已经成立了时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN)^[4]和确定性网络 (deterministic networking, DetNet)^[5]工作组,在相应的网络中提供确定性连接能力,但是 TSN 和 DetNet 难以满足面向大规模端到端 IP 网络的确定性连接要求。因此,对于新型网络基础设施,需要互联这些局域和限制域的确定性网络,实现面向大规模和异构多域的增强确定性网络 (enhanced deterministic networking, EDN)^[6]。

对于行业数字化转型带来的 EDN 需求,以面向智能化的地铁交通场景为例,地铁通信网络需要覆盖主要市区地铁线路,典型示例包括地铁线路的长距多跳组网、车站内网与地铁调度中心多域互联的场景。作为地铁通信的网络基础设施,承载的地铁通信业务中包括调度控制通信、调度电话、视频监控、应急通信、广播通信和办公自动化等多样化的业务类型,其中包括对时延和抖动等级有高要求的确定性业务,面向智能化地铁通信网络典型组网如图 1 所示。

该典型组网覆盖范围可达百千米,涉及多条线路的网络域,同时涉及车站内网络的互联,业

务规模和流量随着数字化和自动化的发展呈现大幅增长的趋势。针对该典型场景的确定性网络需求,传统确定性网络架构和关键技术均面临长距、多跳、异构、多域组网以及逐渐增大的业务规模等挑战^[7],需要有新的 EDN 架构适应地铁数字化和智能化对确定性网络的演进需求。

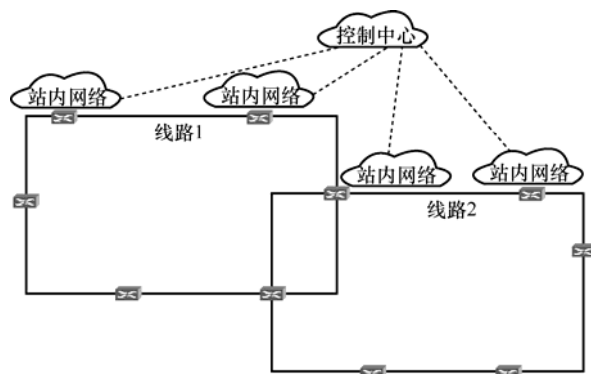


图 1 面向智能化地铁通信网络典型组网

1 面向大规模 EDN 架构

从面向大规模 EDN 的典型应用场景可以看出,传统面向局域和限制域单技术体制的架构将面临以下主要需求和挑战。

- 从业务需求看,大规模确定性网络架构需要考虑支持多样化的确定性业务需求及差异化的服务等级协定 (service level agreement, SLA) 指标,需要提供分类分级的差异化确定性 QoS,仅依赖单一技术机制难以满足差异化的确定性业务承载需求。
- 从网络组网看,大规模确定性网络架构需要满足端到端长距、多跳、跨域、异构、多域组网要求,根据 IETF DetNet 关于增强确定性网络的需求草案^[7],已经总结出增强 DetNet 需要支持长距、多跳、大规模、异步、复杂拓扑和异构资源预留管控等关键需求。
- 从网络技术看,在网络分层模型下已经涌现出异构多样化的确定性链路技术,包括



针对有界抖动的 L2 层 TSN 队列机制^[8], DetNet 的多协议标签交换流量工程 (multi-protocol label switching traffic engineering, MPLS-TE) 隧道^[9], 针对低时延的 L1 层时分复用 (time-division multiplexing, TDM) 光传送网络 (optical transport network, OTN)^[10]/城域传送网络 (metro transport network, MTN)^[11]通道技术, 以及 IETF DetNet 设计组正在讨论的多样化队列方案^[12-17]等, 如何有效管理多样化的“确定性链路”并提供确定性路由, 是确定性网络架构需要解决的关键技术挑战。

面对上述需求和挑战, 结合已有的确定性网络架构研究^[18], 有必要提出新的 EDN 架构, 从而提供面向大规模异构多域统一的管理调度和转发能力协同机制, 融合多样化的资源和技术体制, 满足差异化的确定性业务 SLA 需求。本文提出的 EDN 架构与现有的 TSN 和 DetNet 相比, 主要解决 TSN 和 DetNet 在面向大规模端到端确定性 IP 业务组网和 SLA 性能保障的问题。EDN 与现有技术对比分析见表 1。

1.1 EDN 总体架构

面向大规模 EDN 架构, 首先需要解决面向大规模异构多域的资源预留问题, 具备管理多样化资源和技术体制的能力, 抽象具备确定性能力的确定性链路, 统一编排调度确定性资源; 针对长距、多跳组网, 基于传统分组的队列也需要引入新的基于异步时间的队列机制; 其次大规模网络

复杂组网拓扑增加了构建具备确定性度量路由的难度, 基于资源层的确定性链路, 创建内生确定性路由; 最后, 针对大规模多样化的确定性业务需求, 提供分类分级的流量分类和聚合以及针对分类分级的差异化 QoS。因此, 面向大规模 EDN 架构定义了业务层、路由层、资源层的三维总体架构, EDN 三维架构如图 2 所示。

基于 EDN 三维架构, 3 个维度具体设计如下。

(1) 业务层

业务层针对分类分级的确定性业务流量特性, 在网络入口节点对业务流实施准入控制和流量监管, 并基于确定性路由计算满足需求的端到端网络路径, 从而将确定性流量映射至确定性路径, 以满足差异化的 QoS 目标。业务层会利用资源层抽象的确定性链路和路由层确定性路由实现业务需求和网络能力适配, 通过合适的确定性 SLA 资源编排、确定性路由计算提升业务服务质量和网络利用效率。

(2) 路由层

路由层使用资源层提供的确定性资源和链路集合, 创建具有不同 SLA 类型和等级的内生路由, 通过选择确定性路由提供确定性的转发性能。确定性路由可以基于严格显式路径或松散路由, 前者适用于有控制器的集中式场景, 后者适用于没有控制器的分布式场景。路由层可以结合流量工程支持差异化确定性流量工程机制提供确定性流量优化。

(3) 资源层

资源层统一维护确定性转发资源 (包括链路、

表 1 EDN 与现有技术对比分析

技术名称	主要技术	典型应用场景
TSN	L2 队列增强: IEEE Qbv/Qch/Qcr 等; TSN 管控增强: 集中式、分布式和混合式部署方案及其能力增强	局域网络和 L2 业务
DetNet	L3 转发面增强: 显式路径; L3 控制面增强: 资源预留	限制域 IP 网络和 L3 业务
EDN	异构转发面增强: 多样化确定性转发技术和队列机制; 跨域控制面增强: 多域异构管控; 确定性 QoS 增强: 支持分类分级确定性业务和流量管控	大规模异构多域网络和多样化端到端确定性业务

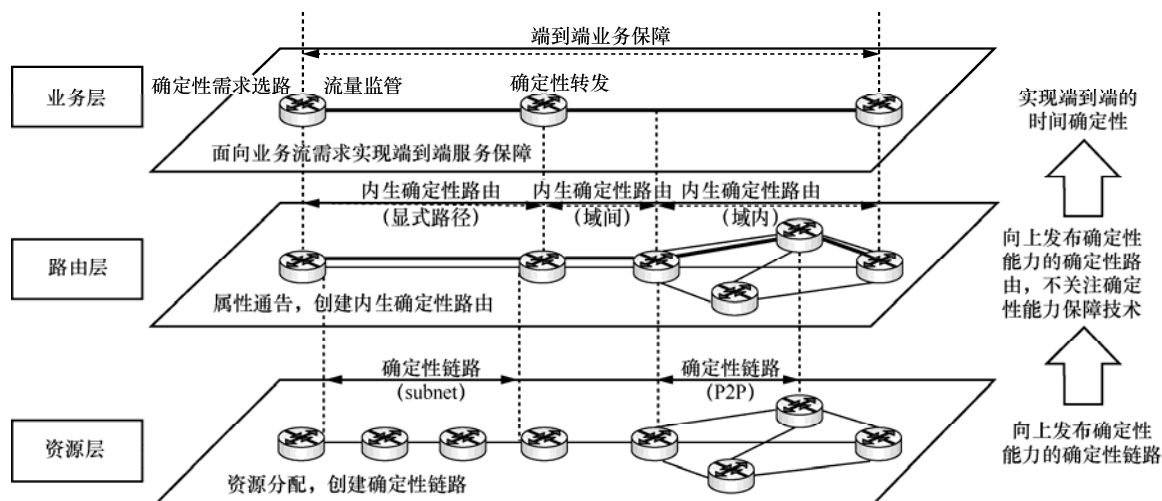


图2 EDN 三维架构

带宽、队列、时隙等），统一建模异构确定性资源以形成确定性链路资源集合，增加基于时间资源的容器提供满足时延和抖动指标的资源分配，为不同级别的确定性转发能力提供保障。确定性链路可以是提供确定性传输能力的子网（subnet）虚拟链路，也可以是点到点（P2P）物理链路。相比传统的链路，确定性链路除了具有确定的带宽以外，还具有确定的时间属性（时延和抖动）。

从 OSI 分层角度看，EDN 的资源层、路由层和业务层可对应 OSI 链路层及以下、网络层和应用层，而且聚焦于对应层次中的确定性能力特性，其中 EDN 资源层可对应 OSI 的链路层和物理层，特指具备确定性能力的链路层及以下的网络资源；EDN 路由层可对应 OSI 网络层，特指具有确定性能力的路由和网络路径；EDN 业务层可对应 OSI 应用层，特指确定性业务相关的映射和适配处理。

1.2 EDN 总体功能

EDN 总体功能示意图如图 3 所示，根据 EDN 的架构分层，按照业务层、路由层和资源层对 EDN 架构的功能进行分类。

资源层需要提供保障确定性 SLA 指标的资源及其抽象建模，根据抽象模型构建确定性

链路，包括多种队列机制或其他转发机制，同时，面向大规模复杂组网支持层次化资源预留等功能。

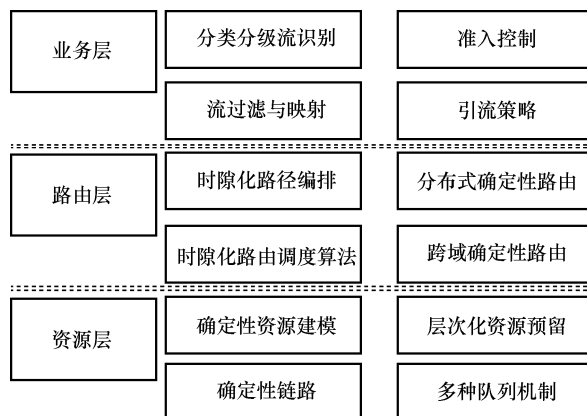


图3 EDN 总体功能示意图

路由层需要在确定性链路基础上，按照内生确定性路由度量计算具有确定性能力的保障路径，支持基于时间资源容器的时隙化路径编排和调度算法，支持集中式、分布式确定性路由能力，支持多域、跨域确定性路由。

业务层在确定性路径的基础上，提供确定性分类分级的流量调度技术，包括分类分级流识别、准入控制、引流策略、流过滤与映射等，也支持业务层的操作维护管理（operation administration management, OAM）和可靠性功能。



1.3 EDN 节点设备

基于 EDN 三维总体架构和功能,可以创建支持 EDN 架构的网络,其中主要由支持 EDN 架构的节点设备互联而成,EDN 架构设计上支持和现有 IP 网络互通,支持较好的架构兼容性。

EDN 节点设备可以采用现有节点设备增强或定义新的节点设备,从而支持 Underlay 和 Overlay 多种组网方式,EDN 节点设备包括转发面和管控面。其中转发面可以由支持确定性转发技术及能力的一种或多种资源构成,如具备一种或多种确定性队列技术的资源。为了灵活组网和支持 IP 网络的兼容性,网络层的报文格式考虑支持多种封装方式,如 IP/MPLS、SR-MPLS/SRv6^[19]等。

EDN 节点组网示意图如图 4 所示,EDN 可以是一个嵌套的网络,EDN 节点则可以通过不同 subnet 的异构确定性技术互连,包括 P2P 物理确定性链路及支持确定性能力的 MPLS-TE 隧道、TSN L2 链路、OTN/MTN L1 TDM 管道,以及层次化嵌套的 EDN 链路等跨层资源,因此,EDN 节点可以和光网络、以太网和 IP 网络混合组网。同时,EDN 节点可以组成 EDN 虚拟网络,通过虚拟网络具备独立的管控。

EDN 节点从确定性连接的角度可以区分为入口节点、出口节点以及中间节点,提供端到端 EDN 架构不同的处理功能,具体如下。

- EDN 入口节点,主要完成确定性业务的准入控制策略,根据确定性业务流分类将业务流映射至对应的确定性路径,根据需要封装流标识、确定性等级、确定性资源标识、序列号、队列信息等信息,以及路由层路由包含的转发信息,将报文转发至指定的下一跳。
- EDN 中间节点,主要接收入口节点转发的业务流量,识别 EDN 封装信息,并在路由层匹配确定性路由和策略,访问资源层确定性资源(如与确定性等级对应的队列、时隙),并根据确定性路由实现确定性流量调度和路由转发。
- EDN 出口节点,主要完成出口流量调度,剥离 EDN 封装信息,完成可能的业务层保护等处理后基于业务信息继续向 EDN 外转发。

EDN 节点管控面支持集中式、分布式、混合式等多种架构模型及其相关功能,可支持南北向接口及相关的协议扩展。

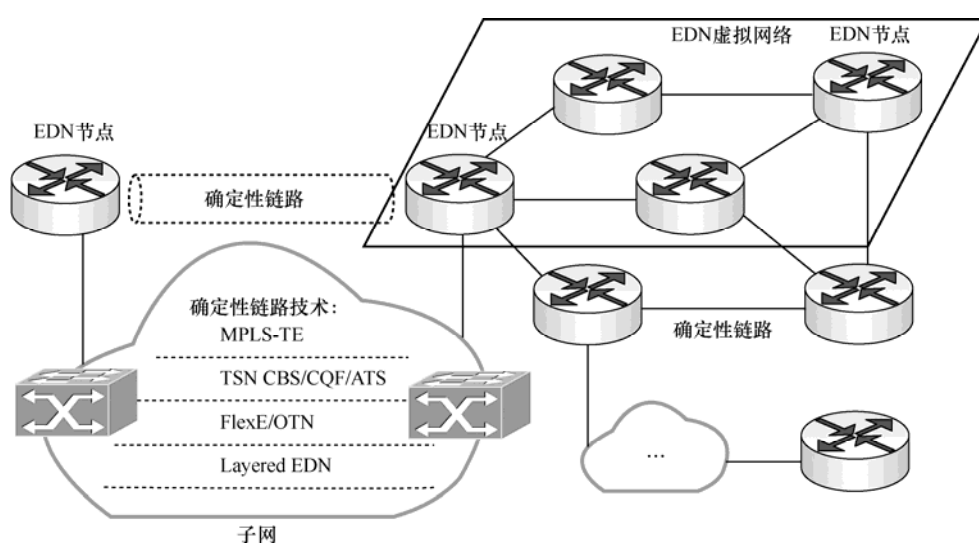


图 4 EDN 节点组网示意图

2 面向大规模 EDN 关键技术

2.1 EDN 分类分级流量调度

EDN 分类分级流量调度技术包括分类分级流量特征信息携带、业务识别及分类分级的引流及转发、业务准入、引流策略配置、资源预留等。

EDN 节点根据接收业务报文的一个或者多个字段进行业务流识别,例如,当确定性业务类型和级别较多时,可以通过报文中新增确定性业务分类分级标识识别业务,在业务分类数量较少的情况下可以使用或扩展已有差分服务代码点(differentiated services codepoint, DSCP)的方式。对应已识别的业务流按照对应的策略转发。对于未识别的业务流,可以通过流量限速、流量监管等方式处理。EDN 节点也可以配置更精细的感知流量周期特性的过滤器或整形器过滤或整形业务流量,对于不符合过滤条件的流量可以直接丢弃或者通过整形等其他手段进行处理,对于匹配成功的业务流,可以通过流量映射等方式映射到相应的网络或资源进行转发。

EDN 节点接收某条确定性业务的请求消息时,获取请求消息中携带的流量特征、数据报文特征、业务对网络的需求等参数,根据业务的 SLA 需求,协商确定性业务等级,根据选路策略选择相应服务能力的确定性路径,结合当前网络的剩余带宽资源状况及流量特征,判断是否有足够剩余带宽资源及合适的时隙允许业务接入,如果有足够的资源,则指定该业务能使用一个或多个时间资源容器(如周期、时隙、队列等)并预留业务所需资源量,形成业务准入控制配置信息。

EDN 节点完成确定性业务准入后,需要将业务引流到相应的路径上转发,对于段路由(segment routing, SR)转发面,可以通过控制面配置 SR 策略(policy)^[20]进行引流,进一步地配合 policy 模板,设置确定性业务类型与颜色的映射关系,可实现基于业务类型将流量引导到对应

SR policy 隧道,其中 SR policy 中需要携带确定性路径,该确定性路径信息中除了指示确定性业务需要经过的节点和出端口外,还需要指示业务被规划的周期、时隙以及时间容器分配的资源,转发面根据上述信息对确定性流进行转发。

2.2 EDN 确定性路由

EDN 节点基于确定性链路资源,分配和构建具有确定性 SLA 能力的确定性路由。和传统路由方法相比,EDN 架构在路由层新增了确定性路由的 QoS 属性参数通告、基于确定性时延度量最优且同时满足时隙容器资源约束的确定性路径计算等核心思想,并体现在分布式路由、跨域路由、集中式时隙化路径编排等技术上。

分布式 EDN 确定性路由由技术需要兼容现有 IP 路由体系,在内部网关协议(interior gateway protocol, IGP)中增加确定性链路信息的扩展,并通过 IGP 洪泛,使得域内节点获知由确定性链路信息构建的 IGP 域内拓扑。EDN 入口节点进行确定性路由计算,例如,以确定性时延(节点队列时延与确定性链路时延之和)为度量,采用时延最小的灵活算法(flex-algo, FA)^[21],计算出一条端到端时延上界满足 QoS 等级的优选路由。

集中式 EDN 确定性路由通过控制器计算规划出一条 EDN 跨域时延最小的显式域间路由,并将端到端确定性时延预算分解到沿途各域。上述时延预算信息下发给沿途各域,各域分别计算出从显式域间路由指定的本域入口到本域出口、时延上界不超过预算值的域内确定性路由。显式域间路由和域内确定性路由共同构成一条确定性的端到端跨域路由。在跨域场景中,除了可创建跨域的流量工程路径,也可以建立边界网关协议(border gateway protocol, BGP)意图路由^[22],迭代至底层的集中式确定性路径或分布式确定性路由。如果采用 BGP 意图路由,需要在路由通告中携带每个域的度量(如时延)分配信息,以灵活地控制每个域的度量分配。



2.3 EDN 时隙化队列

EDN 的资源层支持多种异构确定性转发技术, 对于 IP 网络, 需要支持多种提供确定性能力的队列机制, TSN 队列机制适合局域网应用, 面对当前网络需求存在一定的局限性, 在大规模确定性网络场景中, 已有多种基于 TSN 队列增强或适用于大规模网络的队列机制正在 IETF DetNet 工作组讨论。本文主要介绍一种可支持 EDN 架构通用的时隙化队列转发 (timeslot queueing forwarding, TQF) 机制。

TQF 机制类似 TSN 队列机制, 采用 TDM 与分组技术融合的思想在全局构建时隙分配表。TQF 机制示意图如图 5 所示, 是一种时隙队列抽象结构, TQF 基于统一的时隙容器对不同的业务进行全局的精确编排, 在 EDN 入口节点, 根据业务请求分配时隙容器编号并携带到报文中, 并基于时隙容器资源预留情况实现准入控制。EDN 中间节点识别时隙编号进入对应的时隙队列进行时隙调度转发。同时, 基于时隙化的管控方案, 可以根据 EDN 虚拟网络时隙资源完成最短路径路由选择, 中间节点可以维持业务流的无状态特性, 具备大规模确定性网络上的可扩展性。TQF 语义上能兼容 TSN 等基于异步时间队列机制的管控方案。

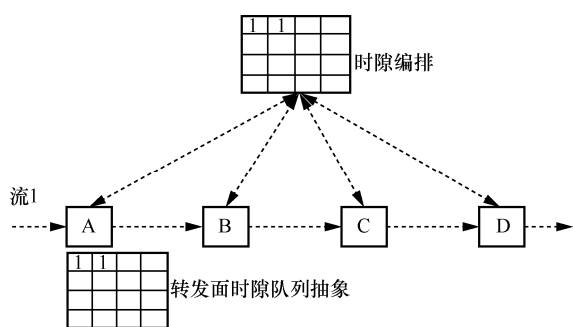


图 5 TQF 机制示意图

2.4 EDN 确定性链路

大规模 EDN 确定性资源的多样化使得网络底层资源和能力具有一定的差异性, EDN 架构为了统一管控, 需要支持对异构差异化资源的管控。

对异构差异化的确定性资源抽象建模为具有不同类型和等级属性的确定性链路, 是 EDN 架构资源管控的基础。

参考当前确定性业务 SLA 指标体系^[23], 可以初步将 EDN 确定性业务类型分为低抖动保证类、低时延低抖动保证类、低时延保证类、有界时延上限类, 不同的类型还可以区分不同的 SLA 指标等级。对应地, 针对不同类型和不同等级的业务流量可以将确定性链路抽象为具有不同确定性属性的链路。同时, 为了支持确定性链路的资源管控, EDN 架构在链路属性中叠加网络资源属性进一步构成时间资源容器, 简称为时隙, 从而可以将确定性链路统一建模为具备时隙化属性的确定性链路。

具备时隙化属性的确定性链路可以和 TQF 队列机制相结合, 实现基于时隙化队列和链路的统一资源模型。以通常的带宽资源为例, TQF 队列和确定性链路资源可以采用单位时间的带宽作为基础的资源管控单位, 根据业务类型和请求的带宽从不同类型的时隙中申请带宽资源, 从而满足基于业务的精细化资源管控的要求, 提升网络资源的利用效率并满足业务的确定性 SLA 需求。

2.5 EDN 层次化管控

EDN 架构为了支持大规模和复杂拓扑, 利用 EDN 三维架构的抽象能力, 可以实现链路级、路径级到业务级的层次化管控模型, 每一个级别内也支持层次化迭代管控, 实现确定性资源管控的灵活性。EDN 层次化管控如图 6 所示, 模型可分为 3 层, 具体如下。

- 链路级: 创建和管理确定性链路, 构建时间资源容器, 提供基于时间的确定性资源预留, 解决不同业务等级之间的资源冲突, 保障确定性转发能力。
- 路径级: 创建和管理确定性路径, 基于时间资源容器和确定性资源规划, 计算端到端时延、抖动、丢包及类型和级别等约束

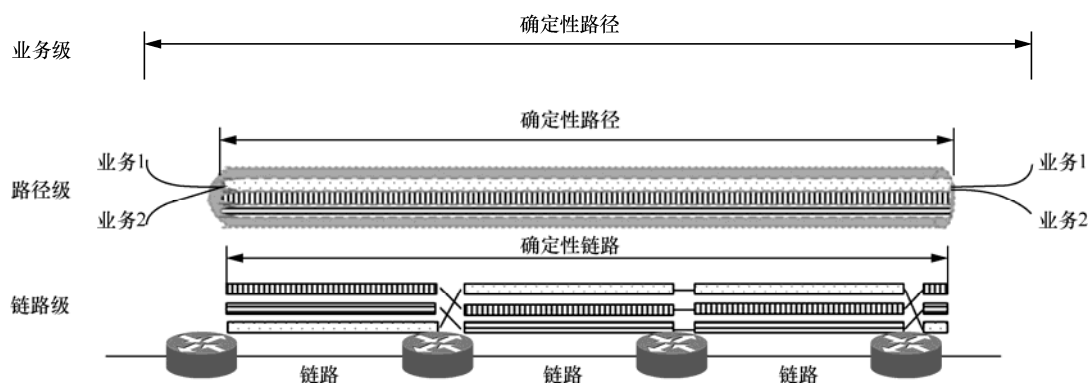


图6 EDN 层次化管控

条件的路径，解决相同业务等级、不同确定性路径之间的资源冲突，保障确定性转发路径。

- 业务级：创建和管理确定性业务，提供基于确定性资源分配的业务，解决相同确定性路径上不同业务间的资源冲突，保障确定性业务转发。

层次化管控可以通过南北向接口支持不同管理域、不同层级的管控交互，利用三维架构对应的三级统一模型，实现规模管控。

3 面向大规模 EDN 测试验证

基于 EDN 架构和关键技术，本文采用中兴通讯研制的 EDN 样机设备进行测试验证，目的是验证 EDN 架构对于大规模（超过 1 000 km 物理网络距离、超过 1 万条不同类型的确定性业务）和多域组网的承载能力，同时验证了 EDN 架构与现有 IP 网络架构的兼容性，验证结果达到预期设计目标。

为了验证 EDN 架构及关键技术，EDN 样机系统测试用例设计主要考虑如下场景。

- 时隙化队列和调度机制叠加背景流，验证 EDN 转发面端到端时延和抖动保障能力。
- 多颗粒时隙化队列和调度机制叠加背景流，验证 EDN 转发面满足不同类型、不同等级确定性业务的时延抖动保障能力。
- 长距多域拓扑、确定性链路路径计算和路由，验证 EDN 路由层组网能力。

由，验证 EDN 路由层组网能力。

- 多颗粒时隙化队列资源管控，验证 EDN 资源层统一管控能力。

验证采用的 EDN 样机为中兴通讯路由器平台化设备，基于可编程芯片和系统软件支持 EDN 架构及其关键技术。

EDN 样机系统搭建了长距多域的试验网，试验网单向穿越 4 跳 IP 路由，物理距离约为 1 500 km，通过环回方式模拟业务流量进行测试，业务路径可达 8 跳 IP 路由，物理距离达到 3 000 km。试验网选择穿越了长距普通 IP 网络，验证对普通 IP 网络的兼容性。EDN 架构验证环境如图 7 所示。

仪表模拟发送确定性业务流量达到链路容量（接入端口 10 GE）的 80%，叠加背景流超出链路容量模拟总流量拥塞，测试结果表明确定性业务流量能通过时隙化队列和调度有效控制端到端转发时延抖动，EDN 架构验证测试结果见表 2。

根据测试结果，基于 EDN 架构的样机设备在长距多跳大规模并发业务流场景下，通过时隙化队列和调度机制，能提供确定性时延抖动，且能兼容 IP 网络混合组网，显示 EDN 架构具备可部署性。

4 结束语

面向大规模 EDN，本文提出了一种三维确定性架构，以及基于该架构所包含的转发面和控制

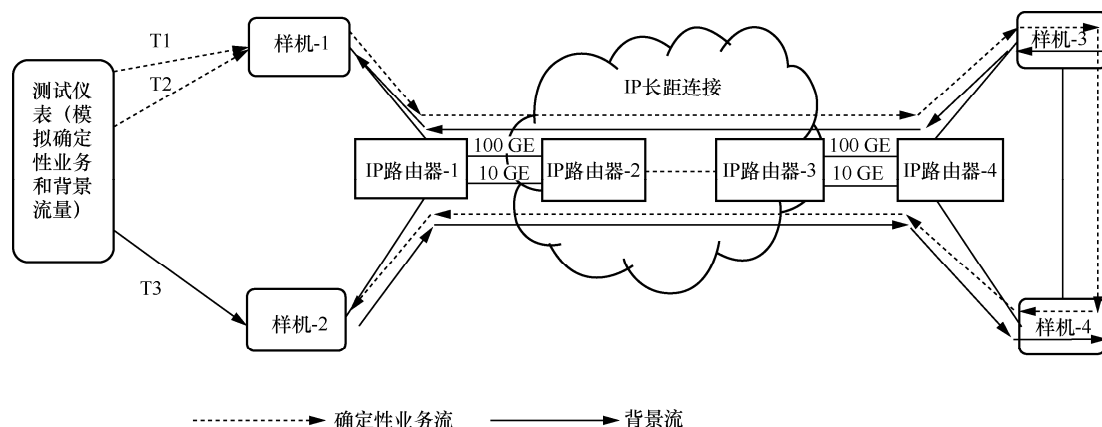


图7 EDN架构验证环境

表2 EDN架构验证测试结果

测试用例	测试内容	测试结果
单时隙颗粒性能测试	10 μ s 时隙叠加背景流性能测试	确定性业务流最大抖动为 13 μ s
	20 μ s 时隙叠加 BE 性能测试	确定性业务流最大抖动为 22 μ s
多时隙颗粒性能测试	变长包混合业务性能测试	10 μ s 时隙颗粒业务最大抖动为 16 μ s, 20 μ s 时隙颗粒最大抖动为 27 μ s
	定长包混合业务性能测试	10 μ s 时隙颗粒最大抖动为 16 μ s, 20 μ s 时隙颗粒最大抖动为 27 μ s
	多周期确定性业务叠加测试	10 μ s 时隙颗粒最大抖动为 18 μ s, 20 μ s 时隙颗粒最大抖动为 34 μ s
汇聚功能测试	汇聚功能测试	10 μ s 时隙颗粒最大抖动为 18 μ s, 20 μ s 时隙颗粒最大抖动为 34 μ s
大规模性能测试	大规模流量测试	30 000 条大规模确定性业务流: 10 μ s 时隙颗粒最大抖动为 13 μ s, 20 μ s 时隙颗粒最大抖动为 25 μ s

面关键技术。为了验证该架构,采用中兴通讯 EDN 样机在试验网中进行了测试验证,验证结果表明,EDN 架构满足大规模确定性网络的需求且能保持和现有 IP 网络架构的兼容性。2022 年 11 月,CCSA TC3 在大规模确定性网络方向获得共识,已完成了 EDN 架构行标立项,并于 2023 年上半年完成 EDN 系列行标立项;国际上,IETF DetNet 工作组于 2022 年 7 月正式修改工作组研究章程,将 DetNet 面向大规模场景的增强正式列入工作计划,目前已经成立了专门的设计组开展研究讨论。本文提出的 EDN 架构及其关键技术已经提交了多份草案,为面向大规模确定性网络技术及 IP 未来网络架构演进开展了积极有益的探索。

参考文献:

[1] 黄韬,汪硕,黄玉栋,等.确定性网络研究综述[J].通信学

报,2019,40(6):160-176.

HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.

[2] 刘韵洁.确定性网络超越“尽力而为”,瞄准“确保可靠”[N]. 2022-09-05.

LIU Y J. Deterministic network goes beyond “best effort” and aims at “ensuring reliability”[N]. 2022-09-05.

[3] IETF. Limited domains and Internet protocols: RFC 8799[S]. 2020.

[4] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks: 802.1Q[S]. 2018.

[5] IETF. Deterministic networking architecture: RFC 8655[S]. 2019.

[6] 未来网络发展大会.确定性网络技术与产业应用白皮书[R]. 2022.

Future Network Development Conference. Deterministic network technology development and industrial application white paper[R]. 2022.

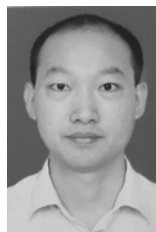
[7] IETF. Deterministic networking (DetNet): requirements for scaling deterministic networks: draft-ietf-detnet-scaling-requirements-05[S]. 2023.

- [8] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks enhancements for scheduled traffic:802.1Qbv[S]. 2015.
- [9] IETF. Deterministic networking (DetNet) data plane: MPLS: RFC 8964[S]. 2021.
- [10] ITU-T. Interfaces for the optical transport network: G.709[S]. 2020.
- [11] ITU-T. Interfaces for the metro transport network: G.8312[S]. 2020.
- [12] IETF. Asynchronous deterministic networking framework for large-scale networks[S]. 2023.
- [13] IETF. Segment routing (SR) based bounded latency[S]. 2023.
- [14] IETF. Deterministic networking (DetNet) data plane - guaranteed latency based forwarding (gLBF) for bounded latency with low jitter and asynchronous forwarding in deterministic networks[S]. 2023.
- [15] IETF. Deterministic networking (DetNet) data plane - tagged cyclic queuing and forwarding (TCQF) for bounded latency with low jitter in large scale DetNets[S]. 2023.
- [16] IETF. Deadline based deterministic forwarding[S]. 2023.
- [17] IETF. Timeslot queueing and forwarding mechanism[S]. 2023.
- [18] 刘鹏, 杜宗鹏, 李永竞, 等. 端到端确定性网络架构和关键技术[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 64-73.
LIU P, DU Z P, LI Y J, et al. End-to-end deterministic networking architecture and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 64-73.
- [19] IETF. Data fields for DetNet enhanced data plane[S]. 2023.
- [20] IETF. Segment routing policy architecture: RFC 9256[S]. 2022.
- [21] IETF. IGP flexible algorithm: RFC 9350[S]. 2023.
- [22] IETF. BGP color-aware routing (CAR)[S]. 2023.
- [23] IMT-2020(5G)推进组. 5G 确定性承载网络 SLA 指标体系白皮书[R]. 2021.
IMT-2020(5G) Promotion Group. White paper on deterministic bearer network SLA indicator system[R]. 2021.

[作者简介]



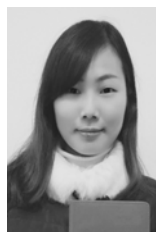
徐军 (1986-), 男, 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为轨道交通通信、铁路信息化等。



刘爱华 (1978-), 男, 中兴通讯股份有限公司高级工程师, 主要从事有线网络系统架构、关键技术研究 and 标准化工作。



孔国权 (1988-), 男, 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为轨道交通通信、信息化网络等。



熊泉 (1984-), 女, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为数据通信领域未来网络确定性。