



专题：确定性网络

面向广域确定性网络的控制面技术研究

石鸿伟^{1,2}, 陈庆强², 程智炜², 黄韬^{2,3}

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏 南京 211189;

2. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

3. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 数据要素的高效配置对于实现传统产业数字化转型尤为重要。网络的供给能力不仅要求数据报文的低时延、大带宽特性, 更需要数据报文的低抖动和确定性。确定性网络技术是构建无损、确定、可靠的广域传播能力的关键。提出了面向广域确定性网络的控制面关键技术及设计思想, 并详细阐述了实现确定性网络感知、业务规划和流量调度的具体方案。通过开展试验验证和应用测试, 证明了系统结构的有效性, 满足确定性网络的管理和调度需求。

关键词: 确定性网络; 网络控制; 软件定义; 周期循环调度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023242

Research on control plane technology for wide-area deterministic networking

SHI Hongwei^{1,2}, CHEN Qingqiang², CHENG Zhiwei², HUANG Tao^{2,3}

1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

3. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The efficient allocation of data elements is particularly important for achieving digital transformation in traditional industries. Network supply capabilities not only require low latency and high bandwidth for data packets, but also require low jitter and certainty in data packets. Deterministic networking technology is the key to build loss-less, reliable, and deterministic wide-area communication capabilities. The key control technologies and design concepts for wide-area deterministic networking were proposed, and the specific plans for achieving deterministic networking perception, service planning, and traffic scheduling were elaborated on. Through experimental verification and application testing, the effectiveness of the system structure is proven and it meets the management and scheduling needs of deterministic networking.

Key words: deterministic networking, networking control, software define, cycle queuing and forwarding

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806406)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806406)



0 引言

网络已成为现代社会的核心基础设施,工业、金融、能源、医疗等各行业领域在数字化发展中依赖网络进行业务模式创新,对网络提出性能可预期、安全可靠、灵活高效等升级需求。例如,在工业互联网场景中,云化可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)的强实时业务要求传输时延小于 4 ms,抖动小于 20 μ s;在电力继电保护场景中,要求继电保护设备端到端双向时延差小于 200 μ s,抖动小于 50 μ s。而传统 IP 网络因其分组统计复用的机制特点,在网络处于高利用率时难以满足上述需求,如何在广泛部署的 IP 网络中演进“确定性”的网络能力成为近几年学术界和产业界的研究热点之一^[1]。

确定性网络(deterministic networking, DetNet)是指在网络中提供确定性服务等级协定(service level agreement, SLA)保障的服务能力,确定性服务质量(quality of service, QoS)要求包括带宽确定性、时延确定性、有序传输、低丢包率和高可用性等,其中时延确定性要求具备确定的时延上界和时延抖动值^[2]。针对不同的确定性特征需求,各类确定性承载技术被相继提出,根据其运行的网络层次可划分为 L0/L1 和 L2/L3 两类技术演进路线。L0/L1 层包括城域传输网络(metro transport network, MTN)、灵活以太网(flex ethernet, FlexE)等时分复用(time division multiplexing, TDM)类承载技术, L2/L3 层包括时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)、确定性网络、增强确定性网络(enhanced deterministic networking, EDN)等基于分组转发机制增强的承载技术。其中, DetNet 作为典型的广域确定性网络承载技术,通过在分组转发机制中引入时隙/周期交换实现数据传输的有界时延保障,实现在规模化组网中的调度灵活性以及网络复用能力,从而支撑确定性、非确定性流的混合传输和差异化保障。

基于周期的多队列循环调度(cycle specified queuing and forwarding, CSQF)机制^[3-4]是国际因特网工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF) DetNet 工作组提出的广域网确定性调度机制,该方案将转发设备的输出队列进行周期性划分,并对确定性流的逐跳行为进行统一的周期调度,使其在确定的时间片内进行转发。而分段路由(segment routing, SR)^[5]技术对报文头的可编程和扩展能力能够原生支持 CSQF 提出的逐跳周期映射机制,结合 CSQF 机制的基于 IPv6 转发平面的段路由(segment routing IPv6, SRv6)承载方案已逐渐成为广域网确定性的主流方案^[6]。

在广域场景下,确定性网络面临多方面的技术挑战与难点。例如,广域场景下的网络环境复杂,涵盖多种类型的网络设备,如何在异构的环境中确保端到端性能(如时延、抖动)的确定性,对决策能力和精度提出了挑战;确定性网络通常需要基于网络模型进行精确的控制,在广域网络环境如何构建高精度的网络模型,需要考虑多方面的因素;在广域网络中(包括链路质量、设备性能、网络环境等),各类型网络设备和系统具有不同的通信和工作协议,存在多种报文转发控制机制^[7],且网络标准尚未完全统一。

当前对广域场景下的确定性网络技术的研究大多关注网络转发平面,而网络控制平面也是广域确定性网络的重要组成部分之一,通过控制信令与数据平面协同工作,可实现对确定性流量的接入控制、路径分配以及资源分配的动态调整^[8-9]。通过引入确定性网络控制平面,实现网络感知、业务规划、流量调度,同时维护和管理整个确定性网络的运行状态信息,实现确定性业务流量的时延确定性调度,这对确定性网络的正常运行和服务质量保障具有关键作用。

本文关注广域网确定性网络的控制平面设计方案, 重点讨论确定性网络控制平面的关键需求和实现能力, 本文贡献有以下 3 个方面: 提出了面向确定性流的控制面逐跳 OAM 感知架构, 提出了面向差异化 SLA 需求的业务规划方法, 提出了基于 SRv6 数据平面的周期队列调度方法。

1 相关标准和研究进展

TSN 由电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.1 工作组提出, 目的是面向标准以太网实现计划流 (scheduled traffic, ST)、音频视频桥 (audio video bridging, AVB) 和尽力而为 (best effort, BE) 流的共网传输。工作组围绕 TSN 技术体系完善了流量整形、时钟同步、网络管理及可靠性传输共 4 个通用标准组件, 有效推动了 TSN 的标准化进程^[10]。

TSN 系列技术应用场景以局域网的工业控制和车载互联为主, 其全网高精度时间同步、复杂门控调度等需求难以在广域网扩展部署。DetNet 由 IETF DetNet 工作组提出, 与 TSN 的目标类似, DetNet 旨在提供对时延、分组时延变化 (抖动) 和极低/零分组丢失的确定性传输能力, 工作组致力于解决 3 层确定性网络的问题, 将确定性传输

能力扩展至远距离大规模的广域网场景, 并完成了多项标准的制定工作, 涵盖整体架构、数据平面要求、控制平面要求、与 TSN 的跨域连接、安全保障等方面^[11]。

中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA) TC3 于 2019 年开始确定性 IP 网络行业标准的制定工作, 相关标准涉及总体架构、设备技术、控制面技术和设备测试方法等。近期, CCSA TC3 提出 EDN 技术和相关标准研究^[12], 以期实现多种网络转发技术的协同, 满足跨网络技术跨管理域等大规模组网范围内的确定性保障。目前, 大规模确定性网络技术和标准已呈现国内标准向国际输出的趋势。

集中的控制面是实现确定性网络统一管理和调度的关键技术, CCSA 和 IETF 已经制定了多篇与确定性网络控制面相关的标准和草案, 见表 1, 其中列出了各项标准/草案的详细信息。

目前, 学术界关于 DetNet 控制平面的研究主要聚焦在周期调度机制、服务保护机制的优化与实现, 缺少控制平面架构、功能方案的设计与实践。例如, 文献[6]和文献[13]提出基于 CSQF 机制的广域确定性网络路由和调度方法, 通过对周期循环机制的优化, 提升确定性流的规划和调度效率, 从而提升确定性流量的网络吞吐性能; 文献[14]、文献[15]和文献[16]针对 DetNet 中数据包

表 1 与确定性网络控制面相关的标准和草案

标准/草案名称	标准组织	当前状态	更新时间
电信网络的确定性 IP 网络控制面技术要求	CCSA	草案	2023 年 4 月
确定性 IP 网络通用封装及协议扩展技术要求	CCSA	草案	2023 年 8 月
面向承载网的增强确定性网络控制面技术要求	CCSA	草案	2023 年 8 月
draft-ietf-detnet-controller-plane-framework, 确定性网络控制面架构	IETF	草案	2023 年 3 月
draft-xiong-detnet-large-scale-enhancements, 大规模确定性网络架构增强	IETF	草案	2023 年 7 月
draft-guo-detnet-vpfc-planning, 确定性网络的数据模型及集中控制	IETF	草案	2023 年 7 月
draft-peng-lsr-flex-algo-deterministic-routing, 确定性网络的 IGP Flex-algo 扩展	IETF	草案	2022 年 8 月
draft-peng-lsr-deterministic-traffic-engineering, 确定性网络的 IGP 扩展	IETF	草案	2023 年 7 月
draft-xiong-pce-detnet-bounded-latency, 确定性网络的 PCEP 扩展	IETF	草案	2023 年 6 月



复制、去重和排序功能（packet replication, elimination, and ordering functions, PREOF）^[17]保护机制带宽利用率低的问题，提出基于分段路由的确定性网络服务保护架构，以实现确定性网络的高效部署和服务保护。

2 广域确定性网络控制面总体方案

2.1 确定性网络对控制面提出的需求

在基于 SRv6 的有界时延标准草案中提出了采用 CSQF 作为确定性流量调度算法^[4]，这为确定性业务开通提供了数据面基础，但是为了提供端到端的确定性，必须依赖路径的确定性。如何实现路径的确定性，并最终达到端到端的时延确定性，这里对广域确定性网络控制面提出了以下几个需求。

（1）网络感知

为了给确定性业务流量分配合适的资源，确定性网络需要控制面能够感知网络中的所有网络资源，包括链路带宽、网络性能、拓扑关系等。相比于传统的 SDN 控制面，确定性控制面更重要的是需要对确定性的业务进行测量感知，为确定性的流量调度提供数据支撑。

（2）业务规划

为了应对不同的确定性业务需求，确定性网

络需要控制面能够面向业务提供差异化 SLA 保障的端到端路径建立。相较于以往的 SDN 控制面，确定性控制面除了需要考虑带宽等因素，还需要考虑流量的优先级、时延、抖动等因素，为确定性流量选择确定性路径。

（3）流量调度

为了能够实现对业务的确定性时延进行调度，确定性网络需要控制面对已部署规划的确定性路径进行测量，并针对测量结果运行调度算法以确定途经节点的每一跳队列资源，进而实现对已部署路径的确定性优化以支撑业务流量的时延确定性调度。

2.2 总体方案介绍

确定性网络总体架构如图 1 所示，展示了确定性广域网总体架构，其中底层转发资源是支持基于 CSQF 队列调度和 SRv6 承载技术的确定性网络节点，支持多种类型网络接入。广域网确定性控制面通过控制底层确定性转发资源来实现确定性业务开通，按照分层架构的设计思想总共包括 3 层，分别是网络感知层、业务规划层、流量调度层。

（1）网络感知层

负责获取广域网中各节点和链路的实时状态和性能信息，为确定性业务规划提供准确的网络

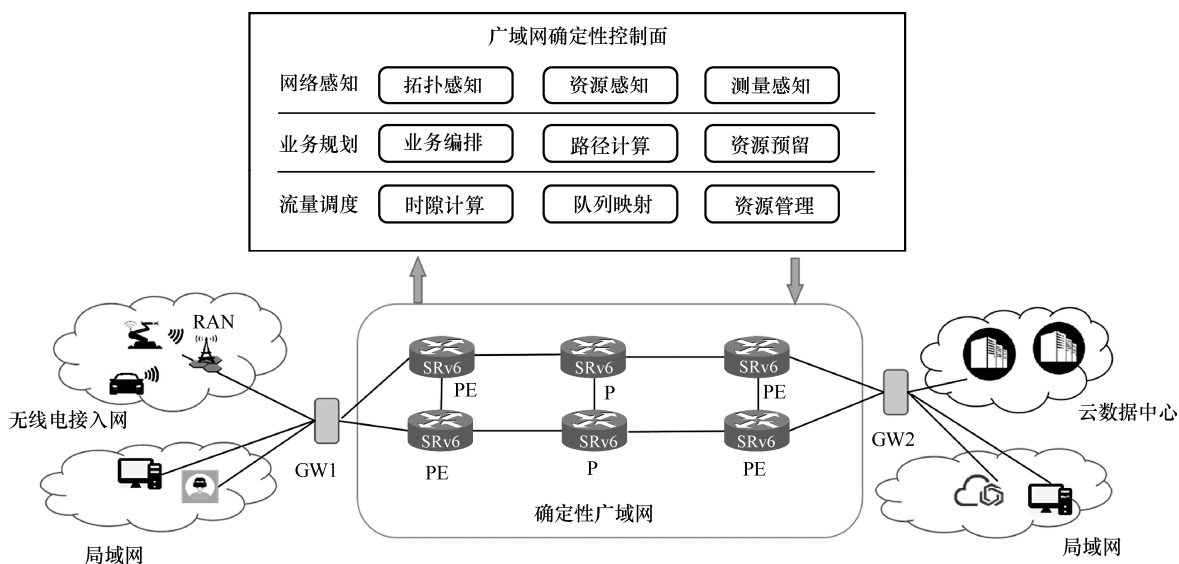


图 1 确定性网络总体架构

感知, 该层主要包括以下模块:

- 拓扑感知模块, 负责获取广域网的拓扑结构信息, 包括节点和链路的连接关系、流量与时延等;
- 资源感知模块, 负责获取广域网中各个节点的资源状态, 包括确定性处理能力、接口带宽等;
- 测量感知模块, 负责对未部署确定性优化的业务路径进行主动测量, 支撑逐跳的时隙映射计算, 实现确定性资源预留。

(2) 业务规划层

负责根据应用的需求和网络感知信息, 制定广域网确定性流量的路径, 该层主要包括以下模块:

- 业务编排模块, 负责面向业务需求提供 API 调用能力, 支持差异化业务部署, 不仅要支持传统的非确定性业务, 还要支持开通确定性业务;
- 路径计算模块, 负责根据网络感知和业务编排需求, 考虑网络拓扑和资源状态, 计算确定性流量的最佳路径;
- 资源预留模块, 负责根据路径计算结果, 预留适当的网络资源, 确保确定性流量的可靠传输和服务质量。

(3) 流量调度层

负责具体的流量调度管理, 确保确定性流量在广域网中的传输时延抖动在确定的可控范围, 该层主要包括以下模块:

- 时隙计算模块, 负责根据主动测量的结果, 分配适当的时隙资源;
- 队列映射模块, 负责根据计算的时隙资源, 对规划的路径节点进行时隙映射, 从而实现转发时延确定性;
- 资源管理模块, 负责确定性相关资源预留, 包括资源的分配、释放以及回收, 以防止分配资源冲突等。

3 广域确定性网络控制面关键技术

3.1 网络感知

获取确定性网络资源是开展确定性业务的前提, 而网络感知是获取网络资源的手段, 网络感知架构如图 2 所示。

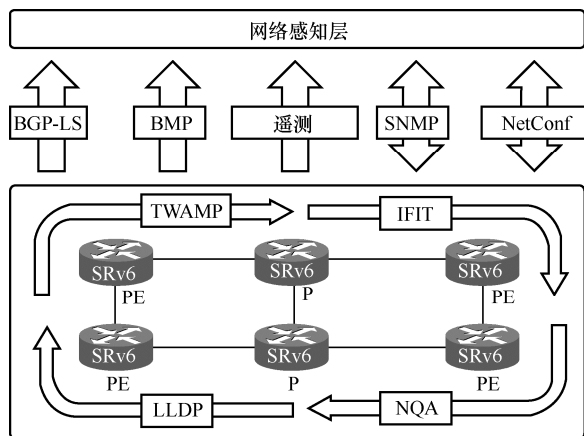


图 2 网络感知架构

(1) 拓扑感知

拓扑感知包含二层拓扑感知和三层拓扑感知。二层拓扑发现需要数据面运行链路层发现协议 (link layer discovery protocol, LLDP), 通过简单网络管理协议 (simple network management protocol, SNMP) 主动获取, 并进行解析形成二层链路的拓扑数据。三层拓扑发现需要数据面运行内部网关协议 (interior gateway protocol, IGP), 通过边界网关协议—链路状态 (border gateway protocol - link state, BGP-LS) 主动推送至控制面, 并解析形成三层链路的拓扑数据。拓扑中的性能数据需要数据面运行双向主动测量协议 (two-way active measurement protocol, TWAMP)、网络质量分析 (network quality analysis, NQA)、随流检测 (in-situ flow information telemetry, IFIT) 等操作维护管理 (operation administration and maintenance, OAM) 协议对链路进行监测, 通过遥测 (telemetry) 的方式主动推送至控制面, 形成链路的实时流量、丢包、时延、抖动等数据。

步骤 1 业务编排模块接收来自不同业务的 SLA, 其中 SLA 详细描述了业务流的需求, 包括对带宽、时延、抖动的需求以及引流方式, 当计算完成路径后会更新该条业务流的 Segment List 映射。

步骤 2 路径计算模块接收来自业务编排模块的路径建立请求, 根据业务类型结合网络感知层的网络拓扑资源: 首先, 进行算路拓扑选择; 然后, 基于 KSP 算法进行路径计算^[18]; 随后, 针对上述算路结果进行路径筛选; 随之, 对筛选的路径结合网络感知层的转发资源构建 SRv6 显示转发路径; 最后, 调用转发网元的引流 API 完成 SRv6 路径部署以及完成业务引流。

步骤 3 资源预留模块对业务规划流程所占用的各类业务资源 (如链路带宽资源、业务标识资源、Segment List 路径标识资源等) 进行预留, 并进行数据入库存储, 以保障再次进行正常业务开展。

在业务规划流程中, 有 App1、App2、App3 共 3 条业务流, 请求建立端到端路径, 经过上述步骤完成确定性路径建立。其中, App2 和 App3 为非时延确定性业务; 而客户端源地址为 1.1.1.1, 请求 IP 地址为 IP-A 的 App1 的服务端, 希望建立一条时延确定的路径, 下一步将进行时延确定性优化。

3.3 流量调度

流量调度层是广域网确定性控制面的核心, 是基于 SRv6 路径确定性实现时延确定性的关键步骤。如标准草案^[3]所描述的, SRv6 新增针对 CSQF 的扩展, 在流量根据 SRv6 的标签转发时该扩展支持指定出口队列能力, 通过在 SRv6 的标签携带每一跳的出口转发队列的方式能够实现端到端的确定性时延转发。而如何确定每一跳的出口队列, 则需要通过 OAM 探测来计算端到端逐跳出口发送队列^[19]。

基于测量反馈的队列映射架构如图 4 所示, 展示了基于测量反馈进行确定性路径的时延确定

性优化流程, 主要步骤如下。

步骤 1 由网络感知层的测量感知模块负责, 主要包括以下步骤。

(1) 根据探测目标分配探测流资源, 包括探测流标识、探测流的封装类型及探测流的源目的地址。

(2) 完成资源分配后, 构建探测任务, 主要包括控制面的测量感知模块构建监听任务, 为后续接收探测结果做好准备以及部署到转发面的 OAM 探测任务。

(3) 部署探测任务, 这里主要指通过 NetConf 管理通道将 OAM 探测任务部署到业务的头节点转发网元。

(4) 测量感知模块, 与逐跳设备建立遥测连接。

(5) 探测任务启动后, 逐跳节点将上报自身探测数据。

(6) 测量感知模块, 解析上报的探测数据, 其中包括从本节点出接口发送探测报文到下一跳时所用的时隙, 并将检测结果推送至流量调度层。

步骤 2 由流量调度层负责, 主要包括以下几步。

(1) 流量调度层针对收到的推送结果进行转发路径关联, 并对段路由由扩展头 (segment routing header, SRH) 逐跳路径按从头到尾的顺序进行遍历。

(2) 时隙计算, 针对逐跳上报的出口所用的时隙, 计算时隙偏移, 以确定出口队列。

(3) 对 SRH 全部遍历完成后, 完成端到端逐跳的出口队列确认。

(4) 队列映射, 完成逐跳的出口队列后, 需要对原 SRH 的逐跳标签增加出口队列索引, 特别要注意的是, 在原始 SRH 增加最后一跳的节点标签, 用以指定最后一跳的出口队列。

(5) 资源分配, 针对确定性时延的路径标识资源进行分配。

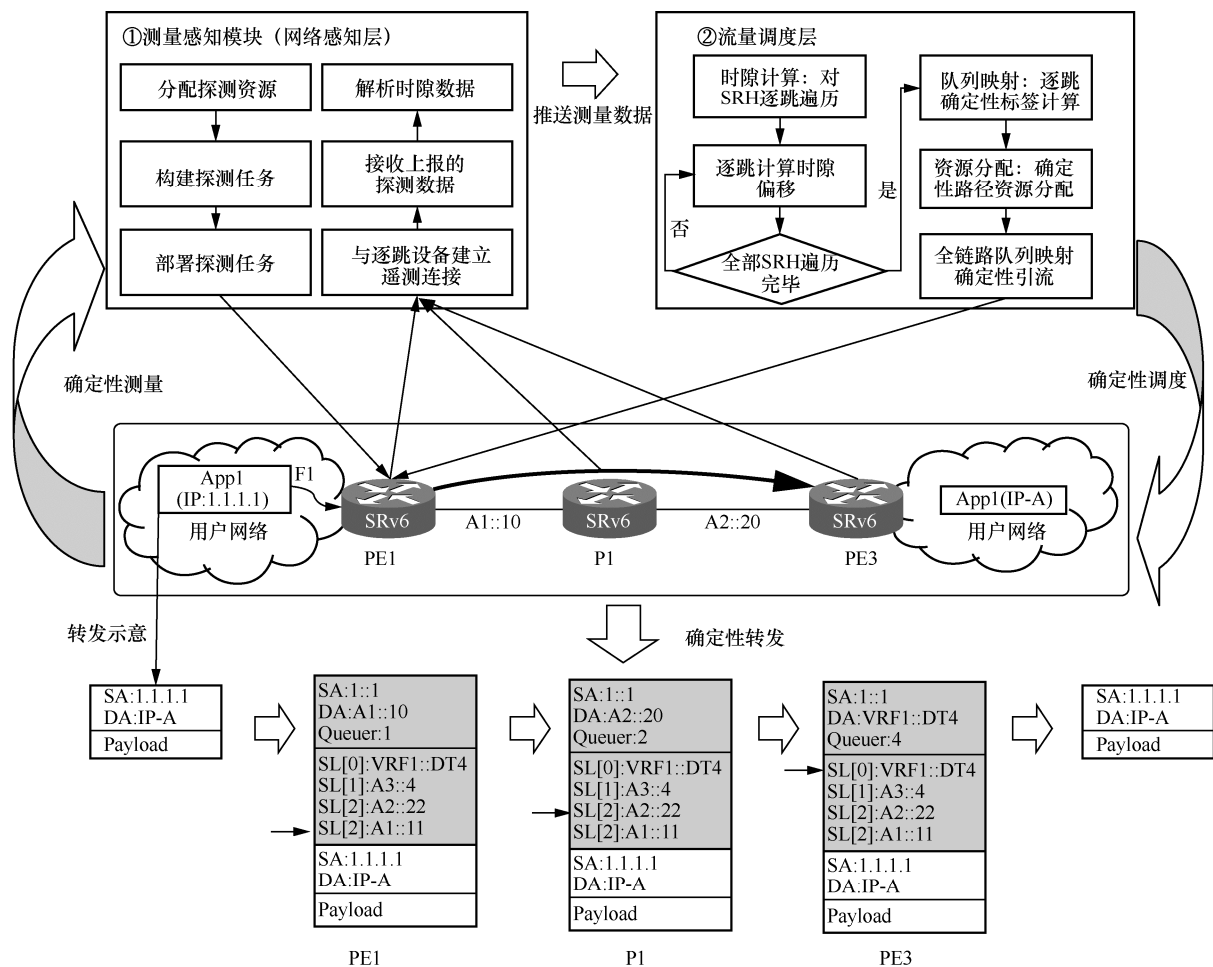


图4 基于测量反馈的队列映射架构

(6) 全链路队列映射，在头节点部署逐跳的确定性资源映射，以实现端到端的确定性时延引流。

如图4所示，承载App1流量的SRv6路径经过上述步骤后，将实现端到端时延确定性转发，与原有的SRv6标签转发相比，标签内容发生了变化。具体变化包括：首先，原有的邻接标签扩展包含了出口队列索引，用以支撑流量到达本节点将从哪个接口的哪个出口队列被发送出去；其次，SRH增加了最后一跳的节点标签，用来确认在最后一跳发送报文时将从哪个队列发送出去。

3.4 技术优势

确定性网络控制系统方案具备全局调度、平滑演进、大规模部署3个技术优势。

(1) 基于全局视角的确定性能力调度与保障

在确定性网络集中控制方案中，控制系统基于BGP-LS、遥测等多种技术可实时感知网络拓扑的全局态势和业务流的关键性能指标，可有效支撑在全局视角下对多用户差异化业务需求实现传输路径计算，并进行时延、抖动、丢包等业务参数的实时测量，实现面向综合态势的资源调度能力。

(2) 支持现网部署的平滑演进

确定性网络数据平面基于SRv6承载技术方案，与互联网已规模部署的IPv6技术栈可实现低成本衔接，基于确定性网络控制系统进行资源状态的统一获取和通告，在传统协议缺少对确定性网络的能力支持时，仍可快速支撑确定性业务开

展，避免了现网设备的规模升级改造，从而支撑确定性能力的平滑演进能力。

(3) 支持向多域大规模网络部署

广域网由于拓扑大规模远距离的特点难以接受单点集中式的控制方案，通过多域控制面系统的协同编排，可实现不同区域网络的分段切片接续，在跨域场景下保障端到端的确定性服务指标。

4 验证与应用

为了验证广域确定性网络控制面关键技术，笔者团队于长三角一体化网络试验设施^[20]构建了基于环路测试机制的广域长距离确定性网络试验环境。试验环境拓扑如图 5 所示，基于长三角网络试验设施开展验证，构建 600 km 传输距离，并使用干扰流产生微突发。具体的，网络拓扑由 4 个确定

性网络路由器组成，分别部署于南京、扬州、泰州和上海 4 个城市，设备间通过长三角网络试验设施的光传输网络连接；数据网络测试仪部署于南京的紫金山实验室，接入位于南京的确定性路由器并生成确定性目标流和干扰流，流量通过中间节点（即扬州、泰州、上海）后沿相同的路径返回南京，综合传输距离约为 600 km。确定性网络控制系统部署于 x86 服务器集群中，基于 NetConf 等南向协议纳管确定性路由器，实现确定性网络的感知、业务规划和调度。

试验环境设备清单见表 2。

测试流参数见表 3，验证环境通过干扰流来产生微突发，目标流和干扰流通过不同的物理接口进入路由器，并从同一物理接口输出，两种流量使用相同的传输优先级。

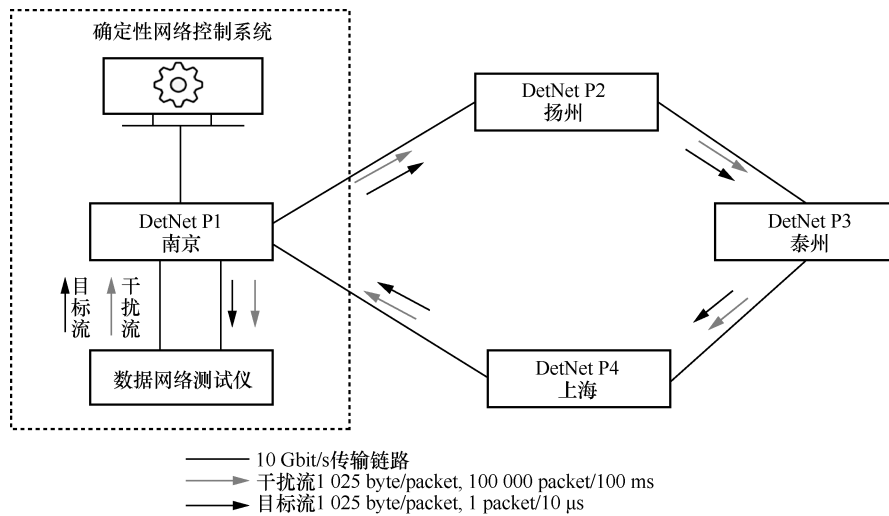


图 5 试验环境拓扑

表 2 试验环境设备清单

设备名称	硬件配置	数量	用途
服务器	操作系统：CentOS Linux Release 7.9.2009 CPU：Intel(R) Xeon(R) Silver 4214 CPU @ 2.20 GHz 内存：DDR3 128 GB 硬盘：24 TB 网卡：Realtek RTL8211E	3	部署确定性网络控制系统
确定性网络路由器	型号：新华三 H3C-CR16010-F	4	构建确定性网络拓扑
数据网络测试仪	型号：SPT-CS0	1	生成测试流量



表 3 测试流参数

流类型	包长	发包间隔	发包数量/间隔	统计流速
目标流	1 025 byte	10 μ s	1	0.82 Gbit/s
干扰流	1 025 byte	100 ms	100 000	8.2 Gbit/s

网络时延测试：逐包采样如图 6 所示，描述了目标流和干扰流时延变化曲线。在传统的 IP 路由转发机制下，可以观察到试验网络端到端传输时延受微突发事件影响，呈现锯齿形抖动的特征，这种抖动现象可能会对网络性能产生负面影响，尤其是在高负载情况下。确定性网络控制系统通过在三层网络中为数据包分配特定的时隙和资源，确保目标流转发始终保持低水平的抖动。这一技术的应用有效地提高了网络的鲁棒性和可靠性，使得目标流能够在复杂的网络环境中稳定、高效地传输。同时，可以观察到目标流的最小时延为 6.621 ms，高于传

统 IP 转发的最小时延 6.607 ms，增加了 14 μ s，这是因为周期循环队列机制对包入队的规则和周期有要求，控制器进行时隙计算时引入了队列延迟冗余。

网络抖动测试：干扰流递增如图 7 所示，展示了传统 IP 路由转发在干扰流不断增加的情况下，抖动逐步上升的趋势。这一变化与基于网络演算理论的分析一致。而在现实中，流量的复杂性和突发情况更为严重。相比之下，确定性流量不受干扰流的影响，端到端的时延抖动被严格限制在 30 μ s 以内。

目前，确定性网络技术已在未来网络试验设施（China Environment for Network Innovation, CENI）确定性网络环境中部署应用^[21]。确定性控制系统作为整个确定性网络的中枢机构，收集转发平面的拓扑、时延、时隙资源信息，基于业务流特征接入和调度规划，实现确

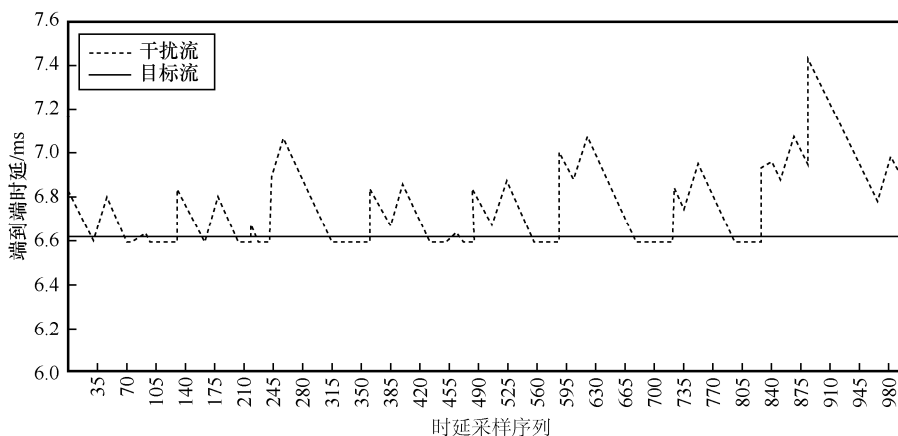


图 6 网络时延测试：逐包采样

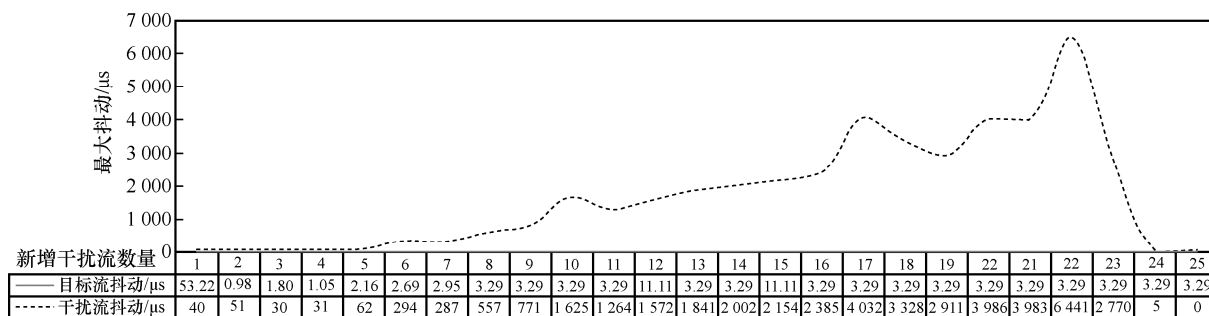


图 7 网络抖动测试：干扰流数量递增

定性业务流的带宽和有界时延转发,满足长距离远程直接存储器访问(remote direct memory access, RDMA)、远程工控等关键业务的传输需求。

5 结束语

确定性网络技术正在快速演进和成熟,其中确定性网络控制技术是实现快速部署确定性业务的关键。本文提出了面向广域确定性网络的控制面设计方案和关键技术需求,并详细阐述了实现确定性网络感知、业务规划和流量调度的具体步骤。通过研制产品原型进行试验和应用测试,证明了本文提出的系统结构的可行性和可部署性,其能够满足确定性网络的管理和调度需求。本文工作为产业界提供了关于确定性控制面设计的思考,有助于进一步凝聚产业共识,推动确定性网络技术发展。

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] IETF. Deterministic networking architecture: RFC 8655[S]. 2019.
- [3] IETF. Deterministic networking (DetNet) bounded latency: RFC 9320[S]. 2022.
- [4] IETF. Segment routing (SR) based bounded latency: draft-chen-detnet-sr-based-bounded-latency-03[S]. 2023.
- [5] VENTRE P L, SALSANO S, POLVERINI M, et al. Segment routing: a comprehensive survey of research activities, standardization efforts, and implementation results[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 182-221.
- [6] KROLIKOWSKI J, MARTIN S, MEDAGLIANI P, et al. Joint routing and scheduling for large-scale deterministic IP networks[J]. Computer Communications, 2021(165): 33-42.
- [7] NASRALLAH A, BALASUBRAMANIAN V, THYAGATURU A, et al. TSN algorithms for large scale networks: a survey and conceptual comparison[J]. 2019. doi: 10.48550/arXiv.1905.08478.
- [8] YAN J, QUAN W, JIANG X, et al. Injection time planning: making CQF practical in time-sensitive networking[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [9] ABBOU A N, TALEB T, SONG J S. Towards SDN-based deterministic networking: deterministic E2E delay case[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [10] 刘扬, 李泽亚, 龚龙庆, 等. 时间敏感网络研究现状及发展趋势[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(6): 1-11.
LIU Y, LI Z Y, GONG L Q, et al. The state-of-the-art research for time-sensitive network and future research interests[J]. Microelectronics & Computer, 2022, 39(6): 1-11.
- [11] IETF. Deterministic networking (DetNet)[EB]. 2023.
- [12] 中国通信标准化协会. 面向承载网的增强确定性网络架构及技术要求[S]. 2022.
CCSA. Enhanced deterministic network architecture and technical requirements for carrier networks[S]. 2022.
- [13] HUANG Y, WANG S, FENG T, et al. Towards network-wide scheduling for cyclic traffic in IP-based deterministic networks[C]//Proceedings of 2021 4th International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN).[S.l.:s.n.], 2021.
- [14] 李硕朋, 方娟, 陈肯. 基于SRv6的确定性网络服务共享保护方案[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 32-42.
LI S P, FANG J, CHEN K. DetNet service share protection scheme based on SRv6[J]. Journal on Communications, 2021, 42(10): 32-42.
- [15] SHARMA G P, TAVERNIER W, COLLE D, et al. Routing and scheduling for 1+1 protected DetNet flows[J]. Computer Networks, 2022(211): 108960.
- [16] LI T C, CAI Y P. A service protection mechanism of deterministic networking based on segment routing[C]//International Conference on Game Theory for Networks. Cham: Springer, 2022: 83-99.
- [17] IETF. Deterministic networking (DetNet): DetNet PREOF via MPLS over UDP/IP: draft-ietf-detnet-mpls-over-ip-preof-07[S]. 2023.
- [18] EPPSTEIN D. Finding the k shortest paths[J]. SIAM Journal on



Computing, 1998,28(2): 652-673.

[19] IETF. Operations, administration and maintenance (OAM) for deterministic networks (DetNet) with IP data plane: draft-ietf-detnet-ip-oam-09[S]. 2023.

[20] 网络通信与安全紫金山实验室. 长三角一体化网络试验设施[EB]. 2023.

Purple Mountain Laboratories. Environment for network innovation in Yangtze River Delta Area[EB]. 2023.

[21] WANG S, WU B W, ZHANG C, et al. Large-scale deterministic IP networks on CENI[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[作者简介]



石鸿伟（1982- ），男，东南大学博士生，网络通信与安全紫金山实验室高级工程师，主要研究方向为未来网络体系架构、软件定义网络、网络智能控制等。



陈庆强（1990- ），男，网络通信与安全紫金山实验室工程师，主要研究方向为网络控制系统、软件定义网络等。



程智炜（1993- ），男，网络通信与安全紫金山实验室工程师，主要研究方向为软件定义网络、确定性网络等。



黄韬（1980- ），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为路由与交换、软件定义网络、内容分发网络、确定性网络、算力网络等。