



专题：确定性网络

确定性网络技术综述

段晓东, 刘鹏, 陆璐, 孙滔, 李志强
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 确定性网络的提出是为了满足如音/视频、工业控制、电力保护等业务的大带宽、低时延、高可靠性等需求。新型业务如虚拟/增强现实、云游戏等的兴起, 丰富了确定性网络的应用场景, 同时也扩展了确定性网络技术的应用范围。针对当前应用场景、技术标准以及产业发展的全局考虑, 分析了面向不同场景的强弱确定性需求和特性, 以及对应的科学性和工程性确定性网络技术, 提出了多样化确定性网络发展路径, 并展望了面向 6G、算力网络的确定性网络组合技术发展。

关键词: 确定性网络; 科学和工程; 组合技术

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023235

Review of deterministic networking technology

DUAN Xiaodong, LIU Peng, LU Lu, SUN Tao, LI Zhiqiang
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Deterministic networking was proposed to meet the demands of high bandwidth, low delay and high reliability for audio and video, industrial control, power protection and other applications. With the development of new services such as virtual/augmented reality and cloud games, the application scenarios of deterministic networking have been enriched, and the scope of deterministic networking technology has also been extended. In view of the overall consideration of current application scenarios, technical standards and industrial development, the strong and weak deterministic requirements and characteristics for different scenarios were analyzed, as well as different kinds of deterministic networking technologies, including scientific and engineering. The diversified development path of deterministic networking was proposed and the development of combination technologies of deterministic networking for 6G and computing force network was looked forward.

Key words: deterministic networking, scientific and engineering, combination technology

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-10

基金项目: 北京优秀青年工程师创新工作室支持项目: 面向 XR 实时交互的 5G-A 网络技术研究

Foundation Item: Beijing Excellent Young Engineer Innovation Studio Supported Project: Research on 5G-A Network Technology for XR Real-time Interaction



0 引言

传统的网际互连协议 (Internet protocol, IP) 技术主要基于统计复用的特性, 极大地提高了网络资源利用率, 同时基于其协议的简单易用性, 作为互联网的基础核心技术自发地连接为全球最大的网络, 促进了社会、科技、经济等在过去几十年间的飞速发展。然而, 音/视频、工业控制、电力保护等业务的涌现, 对网络的时延、抖动、可靠性等提出了进一步的要求, 传统“统计复用、尽力而为 (best effort)”的 IP 机制仅提供面向逐包的基于差分服务的质量保障, 很难提供逐流的基于综合服务的质量保障, 因此, 确定性网络技术应运而生。

确定性网络 (deterministic networking, DetNet) 是一种通过对网络数据转发行为的控制, 利用时间同步、资源预留、队列控制等机制, 实现可预期、可规划的, 将时延、抖动和丢包率等控制在确定范围内的网络技术^[1]。确定性网络的需求和技术原理起源于工业现场网络。工业现场生产环节以及安全预警等业务要求时延在 1~10 ms, 国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 于 2003 年起发布系列标准, 规定了 10 多种现场总线技术^[2], 包括西门子主导的 Profibus/Profinet、倍福的 Ethercat 等。由于工业现场网络以及业务相对简单和固定, 这些协议可以很好地满足时延、抖动等要求。但是行业封闭和私有的特点催生了成千上万种私有协议技术, 为互联互通带来了极大的困难。5G、工业互联网等进一步促进了确定性网络的发展。5G 提出超可靠低时延通信 (ultra-reliable and low-latency communication, URLLC) 业务^[3], 面向垂直行业的网络需要实现“端到端”超低时延保障的需求; 同时, 产业的数字化转型发展促使传统的低时延业务如工业控制、电力保护等部署在云/边缘云, 在网络连接上突破了局域网络/车间

网络规模, 并保留了对时延、抖动和可靠性等方面的严苛要求, 是传统的网络技术无法满足的, 所以各标准化组织、各行各业均进一步开展了对确定性网络技术的研究。

电气与电子工程师协会 (IEEE)、国际互联网工程任务组 (IETF)、第三代合作伙伴计划 (3GPP) 等国际标准化机构先后开展确定性网络的标准研制。IEEE 于 2005 年首先开展确定性网络标准的研制, 先后成立了“音视频桥接 (audio video bridging, AVB) 工作组”以及“时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 工作组”, 应用场景包括音/视频、工业、车载等, 至今已经发布 26 项核心标准, 是其他标准化组织开展确定性网络标准研制的基础。IETF 于 2015 年成立“确定性网络工作组”, 沿用 TSN 的技术体系解决基于 IP 等 L3 的确定性, 当前已经发布 14 项标准, 包括架构、场景、数据面等, 并且已经开展队列调度以及数据面扩展的标准制定。3GPP 从 Release 16 (Rel-16) 开始引入 TSN 最基本的机制^[4], 并先后进行时间同步、确定性服务质量 (quality of service, QoS) 增强, 以及 Rel-17 的确定性能力开放等^[5], 当前已经进入 Rel-18 阶段, 包括提出研究 5G 网络支持 DetNet 的 3 层确定性机制^[6]。

中国通信标准化协会 (CCSA)、工业互联网产业联盟 (AII)、网络 5.0 联盟、5G 确定性网络产业联盟 (5GDNA) 等国内标准化和产业组织也开始进行确定性网络的研究和推进。CCSA TC3/TC5/ST8 等工作组从 2018 年起均已经开展面向运营商网络、下一代移动无线网络、工业互联网的确定性网络行业标准的制定。AII 于 2019 年开始开展确定性网络在工业的应用研究, 2020 年启动了 TSN 产业名录项目以及 TSN 商用产品测试工作。网络 5.0 联盟目前以“资源”“路径”“时间”作为确定性的 3 个层次的要求进行研究, 结合场景的分级分类推动确定性网络的进一步落地。5G DNA 于 2019 年成立, 重点研究 5G 网络

的服务等级协定 (service level agreement, SLA) 保障和确定性机制, 并相继发布多本白皮书。

除了标准以外, 产业界也开展了面向大规模等确定性网络技术的验证。2020 年, 确定性 IP (deterministic IP, DIP) 技术在未来网络试验设施 (CENI) 上得到了初步验证, 实现了长达 3 000 km, 经过 6 跳网络设备的 30 μ s 的确定性抖动。2021 年, CENI 在山东省试验网开展了大规模的基于周期的确定性网络技术时延, 并结合远程医疗进行验证。2022 年, CENI 正式开通了覆盖北京、南京、上海等 35 个城市的广域确定性网络。

本文分析了当前确定性网络技术的现状, 提出了不同种类的确定性场景需求, 确定性网络技术所包含的科学性和工程性问题, 以及端到端确定性网络保障的挑战, 为确定性网络技术的进一步研究、推广和部署提供参考。

1 确定性网络的场景演进

确定性网络的需求场景从工业、电力等传统面向企业的应用而来。在工业场景下, 运动控制、过程控制等, 时延要求从 1 ms 到 100 毫秒级不等^[2]; 在电力场景下, 发电、输电、变电、护电等不同场景也都有明确的毫秒级时延要求; 此外, 对于将来自动驾驶、远程医疗、远程控制等场景, 通常也要求毫秒级的时延和微秒级的抖动。这类场景可以称为“强确定性场景”, 确定性网络场景分类如图 1 所示。如果这些服务超出时延和抖动的界限, 将带来财产损失和安全风险, 因此无法容忍任何网络的不稳定性, 这类场景可以投入更多的成本用于保障网络的确定性。

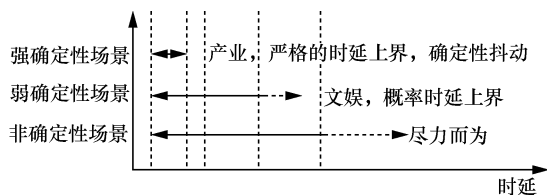


图 1 确定性网络场景分类

随着 5G 和产业互联网的发展以及面向 5G 演进技术和 6G 的演进, 确定性网络的应用已经逐渐扩展到云游戏、AR/VR、元宇宙等面向用户的新兴应用。这些应用的 SLA 要求相对较低, 可以称为“弱确定性场景”。这些服务的用户希望有更好的网络体验, 并且可以在一定程度上容忍网络质量变差的情况。因此, 不同于“强确定性场景”严格的“时延上界”要求, “弱确定性场景”通常并且能够在很小的概率内容忍超过时延上限, 对网络的确定性要求相对较低, 并且用户愿意支付更多的费用保障高质量的网络服务。“弱确定性场景”不仅拓展了确定性网络的应用领域, 也拓宽了确定性网络的技术范围。

对于不同种类的确定性网络场景, 可以采用不同种类的技术满足。一方面, 对于“强确定性场景”, 需要采用以报文或流的调度和控制为基础的技术, 保障严格的确定性, 实现毫秒级的时延和微秒级的抖动, 可称为“强确定性技术”。此类技术对于设备要求高, 需要全网设备的升级, 如 TSN 以及 DetNet 中规定的大部分标准, 由于需要精细的流量排定, 通常涉及具体的科学性算法问题。另一方面, 对于“弱确定性场景”, 可以采用以资源专用、流量工程、端侧调度等为基础的技术, 在一定程度上提升网络的服务质量, 可称为“弱确定性技术”。此类技术或对设备要求低, 或是已有技术或组合技术, 如网络切片、流量工程、拥塞控制等, 通过工程性的技术即可实现, 但是无法满足工业控制、电力保护等严格的确定性要求。

2 确定性网络中的科学和工程性问题

2.1 确定性网络的科学性问题

2.1.1 排队论问题

排队论 (queuing theory)^[7], 又称随机服务系统理论, 是基于服务对象到来时间及服务时间的统计模型, 针对等待时间、排队长度、忙期长短等得出统计规律, 并根据统计规律对服



务系统进行结构和组织的改进，目标是既能满足服务对象的需求，又能在系统的低开销等方面达到最优。

排队论研究的模型基于泊松过程，即一系列平均时间已知、发生时间随机的离散事件，如客户给客服中心打电话、网站的访问者等。起初对于网络的流量研究也曾考虑基于排队论模型，但是由于网络流量具有突发性、周期性以及自相似性，如互联网流量的瞬时性、并发性以及部分流量的周期特性等，不满足于泊松过程的建模过程，所以排队论无法直接应用于网络流量的研究，也不适用于确定性网络技术的研究。后来网络演算被提出^[8-11]，考虑了网络流量的相关性模型，被广泛用于研究和实现确定性网络服务。

2.1.2 网络演算

网络演算最初由 Cruz 在 1990 年提出^[8-9]，利用最小加代数和最大加代数进行网络性能的分析，基于到达曲线和服务曲线，分析网络的积压和时延上界，从而对网络性能的优化给予指导。最初的网络演算是面向确定性队列调度，称为确定性网络演算，后来经研究发展，也产生了随机网络演算。文献[12-14]对网络演算的提出和后续发展进行了比较全面的总结。

2.1.2.1 确定性网络演算

在确定性网络演算中，数据流的模型描述为累积量函数 $R(t)$ ，即在时间间隔 $[0, t]$ 内观测到的比特数，包括连续时间模型、不连续时间模型以及离散时间模型，对应具备不同应用发送的数据流特性，或节点接收到的整体的数据流特性。到达曲线和服务曲线如图 2 所示。到达曲线为一个广义递增函数 α ，对流 R 具备约束：当且仅当对于所有 $s \leq t$ 时，满足 $R(t) - R(s) \leq \alpha(t - s)$ ，称 α 是 R 的到达曲线。图 2 (a) 呈现了一条大于或等于流 R 比特数的曲线。服务曲线也是一个广义递增函数 β ，假设流 R 在经过系统 S 的输出为流 R^* ，满足 $\beta(0) = 0$ ，且对于所有 $t \geq 0$ ，有 $R^*(t) \geq$

$\inf_{s \leq t} \{R(s) + \beta(t - s)\}$ 。图 2 (b) 呈现了一条小于或等于流 R 比特数的曲线，其中斜率 γ 可以看作分配给 R 的处理速率。

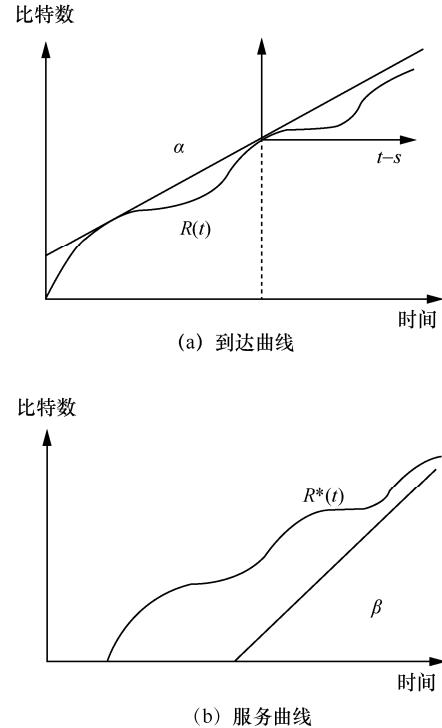


图 2 到达曲线和服务曲线

从流量的到达曲线和系统的服务曲线可以得出流在系统中的积压 $R(t) - R^*(t) \leq \inf_{s \geq 0} \{\alpha(s) - \beta(s)\}$ ，积压界限和时延界限如图 3 所示，积压界限为 α 与 β 函数在任意时刻 t 的最大垂直距离，即流 R 停留的比特数，和系统的处理性能相关。同时，利用 α 与 β 函数在比特数相同的最大水平距离 $\delta(s) = \inf\{\tau \geq 0: \alpha(s) \leq \beta(s + \tau)\}$ 也可以得出时延界限，如图 3 所示，时延界限为流 R 从到达系统后到被系统处理完毕后离开系统的时间，和系统中的调度策略有关。如果以单台设备对某一类流服务和到达曲线进行分析，可以得到期望的缓存以及时延要求，从而指导为某一类流进行配置所预留的资源以及队列调度的参数。例如，在 TSN 的时间敏感整形以及循环队列调度等机制中，都涉及队列长度大小的设置，需要保证在能够容纳和处理相应的流的同时，兼顾转发的效率。

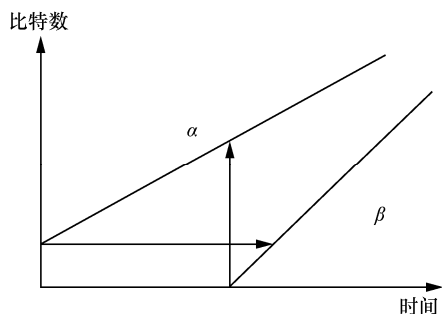


图3 积压界限和时延界限

确定性网络演算被提出后, 引发了大量的研究, 文献[15]通过分析服务曲线的瓶颈效应、端到端时延的近似确定性上界, 计算了服务曲线以速率等待时间等形式表示的保证时延确定性上界。文献[16]基于网络演算建立了 3 种整形器的一般模型, 包括贪婪无损失整形器、无缓冲区整形器及固定缓冲区长度整形器, 获得了输入/输出特性以及提高 QoS 控制机制的效率等。文献[17]展示了如何应用网络演算的分析方法寻找交换式以太网中时间的硬上界, 并通过示例场景的仿真验证了分析结果。文献[18]针对多媒体场景, 通过发送端的有限预测, 计算了时延、缓冲区大小等。文献[19]面向大规模网络, 使用一种新的代数算法, 在性能、精度和计算成本方面都有很大的提高。

2.1.2.2 随机网络演算

由于确定性网络演算用于严格地保障网络的积压和时延, 通常会按照最差的情况考虑, 所以资源利用率不高。而后衍生出了随机性网络演算^[10,12-13,19], 又称概率性网络演算, 可以在一定概率范围内保障网络的时延以及积压等, 兼顾资源利用率。

随机网络演算考虑网络数据流的随机性、突发性、自相识性等特性, 以及网络信道的接入拥塞物理信道的衰落等因素, 更加匹配真实的网络流量场景。相较于确定性网络演算, 随机网络演算的概率范围满足上界性质, 更匹配弱确定性场景的要求, 被广泛用于各种场景中。文献[20-25]分别针对无线网络、软件定义网络 (software

defined network, SDN)、航空电子全双工交换式以太网 (avionics full duplex switched Ethernet, AFDX)、能源网络、电力网络等应用随机网络演算并对其理论性能进行分析。

同时, 数据流的随机性需要引入随机到达曲线来对到达过程进行建模, 而数据流到达过程的随机性也会引发节点剩余的服务过程的随机性。所以随机网络演算需要同时用随机到达曲线和随机服务曲线替代确定性网络演算中的曲线模型, 并且都多了一个概率上界函数, 在考虑网络实际状态时也增加了理论难度。例如, 基于随机到达曲线推导网络性能的概率上界本身存在一定的困难, 通常需要限制随机到达曲线中概率上界函数的性质来解决。并且, 随机性的到达曲线和服务曲线可以有多种形式, 需要运用不同的数学方法和表达方式, 应用起来相对比较复杂。

对于随机网络演算理论的研究, 目前还在进行中。文献[26]采用有效带宽理论中的矩母函数描述到达流量和网络服务, 以更直观和简单的方式计算网络的端到端积压和时延边界。文献[27]针对特定调度算法, 提出了基于可丢弃报文的服务曲线的网络端到端性能分析。文献[28-29]通过求解性能参数期望值而不是概率分布特性研究网络端到端性能。文献[30]采用鞅的方法与随机网络演算结合, 计算时延概率上界更紧凑、计算普适性更强。

2.1.2.3 网络演算对于实现确定性网络的作用

确定性网络演算和随机网络演算分别针对确定性上界以及松弛的概率确定性上界进行建模分析优化。一种完全保障时延, 另一种兼顾了资源利用率, 分别适用于严格和非严格确定性场景。对于差异化的业务需求, 需要结合多种控制面方法, 平衡性能与成本的关系。

但是, 网络演算本身是针对网络性能的分析 and 优化, 并不是直接通过转发技术保证网络的确定性性能范围, 具体的应用方式不受限于转发机



制，即可以在任意转发机制上应用，包括“尽力而为”。所以确定性网络还需要队列调度以及资源预留技术保障数据报文的按时到达。

2.1.3 队列调度

2.1.3.1 队列调度的原理和现状

确定性网络的核心技术是通过逐包、逐流、逐类、逐队列等调度粒度的精细规划和控制，实现微秒级的时延和纳秒级的确定性抖动保障。逐包调度是最细的调度粒度，如以线速编程数据包调度（programmable packet scheduling at line rate, PIFO）队列，能改变一个包在单个队列中的排队顺序。每队列调度如严格优先级调度般的以队列间的调度顺序为最小调度单位。每流调度可以识别流 ID，从而在不同流出队时进行每流粒度的限速和整形。

队列调度通常需要对所有设备以及所有流量进行精细的排定，包括哪个报文在什么时间到达哪一台网络设备。假设流种类 $F_n=[f_1, f_2, \dots, f_n]$ ，网络设备 $D_n=[d_1, d_2, \dots, d_n]$ 以及时间 $T_n=[t_1, t_2, \dots, t_n]$ 。对于某一条流 f_n ，需要计算出它转发时所经过的所有网络设备 D_n 以及相对应的时间 T_n ；对于某一台网络设备，通常有 8 个队列，需要维护一个时间表，使各个队列按照时间表进行开启或者关闭，从而规划各个流的等待和发送时间，时间表粒度通常是微秒或纳秒级的；对于某一时刻 t_n ，所有的网络设备 D_n 都会执行相应的队列开启或者关闭操作。

可以看出，队列调度其实是计算 N 种流量在 N 台网络设备的接收和发送时间的问题，同时考虑了设备内部的队列数量以及处理速率。IEEE TSN 工作组已经发布了若干队列调度机制，包括基于时间同步的时间敏感整形（TAS）^[31]，以及基于非时间同步的异步流量整形（ATS）^[32]等，目前已经作为核心的队列调度机制被广泛研究。在 TAS 的基础上，通过限定队列个数以及周期时间，循环队列调度（CQF）^[33]被提出。文献[34]

在 CQF 基础上提出全局循环排队转发 3 队列（GCQF-3）并对比了与原始 CQF 以及 3 队列 CQF 的性能。

当网络规模和确定性流量种类在一定范围内，队列调度可以通过线性规划、启发式算法、元启发式算法等进行流量排定，文献[35]对现有的调度机制进行了比较充分的总结。当网络规模以及确定性流量增加，全局队列调度的复杂度至少是 NP-hard 级别，甚至是指数级优化问题。所以面向广域网的确定性，大多需要基于流聚合，并采用 CQF 这类相对简单的队列调度方案。文献[36]基于频率同步，在 CQF 的基础上演进大规模确定性网络（LDN）转发技术的机制，已经被验证可以在广域的网络中运行。文献[37-38]也在面向广域或者跨域连接的队列机制进一步研究了其性能。

在性能方面，TAS 使用门控列表控制流是否发送，门控列表状态切换的频率可以支持纳秒级，所以在一定的流种类和网络设备范围内，利用 TAS 可以实现至少微秒级的时延和纳秒级的抖动，CQF 基于 TAS 放宽了门限控制的条件，在性能方面一般会弱于 TAS，但是可扩展性更强。LDN 技术由于面向广域，一方面需要考虑流聚合后的带宽，另一方面需要考虑长距离的传输时延，同时还需要考虑多种流量的普适时延要求，所以一般循环周期定为微秒级，时延上限和设备数量以及周期大小相关，抖动只和周期大小相关，即 LDN 至少可实现毫秒级的时延以及微秒级的抖动。

2.1.3.2 队列调度对于实现确定性网络的作用

确定性网络的队列调度机制可以保障严格的确定性性能，最好的情况下可以实现微秒级的时延和纳秒级抖动，广域网中理论上可以实现 10 毫秒级的时延和 10 微秒级的抖动。它改变了传统互联网尽力而为的转发方式，对传统互联网的设计原则提出了挑战。但是由于其复杂性，目前仍受限于局域网的适用范围。虽然面向广域网的设计机制，如 LDN，已经被提出，但是还需要进一步

的多流量、大规模网络验证其性能。

同时,面向多样化的确定性业务需求,更多的广域队列调度机制需要被进一步提出。此外,一些流量整形机制,如基于信任的整形(credit based shaper, CBS)^[39],可以和队列调度机制结合使用,增强对报文转发的确定性控制,但可能在一定程度上影响设备处理报文的时间。

2.2 确定性网络的工程性问题

在网络演算等科学理论以及队列调度等规模计算的前提下,确定性网络还面临一些实施和成本问题,例如,需要对网络设备进行升级从而无法快速规模部署等。所以为了应对新型业务的网络需求,通过现有的工程性技术优化网络的时延、抖动、丢包率等路径也被广泛提出,包括资源预留、显示路径、网络切片、流量工程、边缘计算等。此类技术不需要复杂的理论和算法支撑,被看作通过工程性技术实现确定性网络的方法。

对于确定性网络的长期发展,科学性问题和工程性问题需要同时被考虑,在一定情况下,工程性技术的实施也同样会面临科学计算和优化的问题。例如,在大规模确定性网络的需求下,显示路径计算、网络切片规划、流量工程优化等技术都会因为网络规模的增加导致计算难度的增加。所以,确定性网络的工程性问题也同样重要,需要进一步研究解决。

2.2.1 资源的隔离和确定

资源隔离是实现确定性网络的必要条件,独占的资源可以提供专用的网络通道,保障确定性业务流不受其他流量的影响,包括资源预留、显示路径、网络切片等技术。

资源预留协议包括 IETF 制定的资源预留协议(resource reservation protocol, RSVP)^[40]、资源预留流量工程(RSVP-traffic engineering, RSVP-TE)^[41]以及 IEEE 802.1 制定的流预留协议(stream reservation protocol, SRP)^[42]等,发送沿路的报文检查并预留资源,有独占以及共享等多

种模式。但是在国内目前并无广泛应用,一方面是网络整体带宽基本满足现有业务,另一方面应用资源预留机制也会降低网络的资源利用率。所以需要在提升资源预留的粒度和准确度上,以及面向多样化的场景进行改进。此外,资源预留只能通过保障带宽优化时延,但是无法保障时延的上界。

显式路径主要是指确定性的路径,是 DetNet 架构^[43]中的一项功能要求,通过源地址路由 SRv6 协议可以比较容易地实现报文转发路径的确定。路径的确定性同时也可以实现部分资源的确定,且有助于实现时间以及可靠性等确定性,但是路径的确定同样属于优化方法,无法保障时延上界。

网络切片由 3GPP 定义,后续也发展至其他标准化组织,如 IETF 等,被看作 5G 确定性网络的关键技术,主要是通过物理资源隔离或者软件资源隔离保障资源的独享性,结合无线侧资源预留、核心网应用网络功能虚拟化(NFV)、传输网应用虚拟专用网络(VPN)+QoS 或者灵活以太网(FlexE)/城域传送网(MTN)等技术,进一步保障端到端网络的可靠性和安全性,从而提升网络的确定性。通过物理资源隔离可以极大提升网络的确定性,软件资源隔离的性能差一些,但是并未改变网络尽力而为的转发模式,所以仍然无法严格保障时延上界。

2.2.2 组网和流量的优化

组网和流量的优化可以提升网络整体性能,是实现确定性网络的辅助技术,包括边缘计算、流量工程等,但是无法实现严格的确定性保证。

边缘计算仅能够为用户提供就近、定制化、灵活的网络和计算服务,由于其大幅缩短了承载网的传输距离,可以显著降低网络的传输时延,近几年也被看作实现确定性网络的方法之一。边缘计算可以缩短承载网的时延,主要的时延来自 5G 系统以及传输网。由于运营商的网络拥塞主要发生在接入网,所以边缘计算也仅仅是优化了整



体的平均时延,无法保障确定性的时延上界。

流量工程的主要目的是在促进有效、可靠的网络操作的同时,优化网络资源的利用率和流量的性能^[44],包含了资源预留协议(RSVP)、QoS、多协议标签交换(MPLS)网络等多方面的技术。流量工程可以在整体上优化和提升网络性能,对提升网络的确定性有一定的帮助,但是本质上还是面向全局的调优,无法保证面向业务的确定性要求。

2.2.3 端侧的收发控制

端侧的收发控制是实现确定性网络的轻量级技术,通过应用的开发,优化网络流量,适用于端侧以及服务器侧时延占端到端时延的较大比重的场景。

端侧的确定性主要通过传输层协议优化,例如,远程直接数据存取(RDMA)可以将数据直接从一台计算机的内存传输到另一台计算机,无须双方操作系统的介入。基于融合以太网的RDMA技术RoCE可以看作RDMA技术在超融合数据中心、云、存储和虚拟化环境中的应用。

近年来,快速用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)网络连接(quick UDP Internet connections, QUIC)以及面向QUIC优化的应用也被广泛提出。例如,基于QUIC的时延敏感传输协议(deadline-aware transport protocol, DTP)^[45],通过端侧设备对于数据块剩余时间的感知,调整数据块的发送优先级,从而保障高优先级的数据块按时到达。实验结果表明,在拥塞的情况下,采用DTP可以显著提升关键数据的按时到达率。

资源的隔离和确定、架构和流量的优化以及端侧的控制技术可以优化平均时延,甚至在某些场景下保障网络的确定性,达到数十毫秒级的时延水平,但是无法100%保障时延上界。一方面,由于缺乏细粒度的转发控制,对于流量的突发性无法处理;另一方面,如果多确定性业务流共同

使用一个预留的网络资源通道或者在一个切片内传输,这些流量之间可能会相互影响。而为每一种业务流都预留或者划分相应的切片资源,会受制于划分的带宽粒度,影响资源利用率,且成本往往比较高。所以此类技术或者技术的组合适用于弱确定性场景。

2.3 确定性网络的技术组合展望

2.3.1 移动网的确定性

5G和确定性网络的结合近两年也已经在3GPP开展标准制定。Rel-16阶段将5G系统作为透明的TSN桥集成在TSN系统中,支持TSN协议族中最基本的5个协议,并且研究5G系统时钟与用户设备(UE)、基站(gNB)、用户面功能(UPF)之间的时间同步问题。Rel-17阶段支持内生确定性,将5G系统作为时钟源,支持应用功能(AF)通过网络开放功能(NEF)向5G系统提出业务需求及时间同步需求等,并且研究终端间路由优化问题。目前在Rel-18阶段研究引入IETF DetNet支持广域的确定性,主要是研究DetNet控制器与5G系统映射的问题,包括将DetNet流量配置文件和流量规范转换为5G系统的QoS参数,以及5G系统和DetNet之间的能力开放和信息交互。

对于5G系统本身,支持TSN或者DetNet可以为系统提供更稳定、准确的信息交互,不过目前仍然存在一些问题。5G和TSN结合的问题在于,一方面无线侧资源比较稀缺,传输网有切片分组网络(slicing packet network, SPN)等较为完备的技术协议,不一定支持TSN;另一方面,无法解决N6接口以后的承载网的确定性问题,需要进一步的协同。5G和DetNet结合的问题在于,一方面DetNet目前无成熟产品和案例;另一方面DetNet还没有广域的标准方案,不一定能很有效地支持面向广域的5G系统的要求。整体来看,5G确定性网络的标准技术还有待进一步发展,并且5G端到端网络的确定性需要进一步的域间协同机制保障。

2.3.2 固网的跨域确定性

跨域的不确定性是满足未来业务确定性的必然要求,除了包括上文提到的无线网、核心网、传输网、承载网的技术协同,还包括数据中心网络/局域网和广域网的协同,以及广域网中各自治域(AS)之间的协同,是在实现单域确定性基础上进一步增强的技术要求。

基于已有技术提供跨域的确定性保障时,需要加强各域之间的技术一致性。例如,在通过基于 IPv6 转发平面的段路由 SRv6 确定路径时,需要确定全域的路径,如果某个域的网络路径没有确定,会引发整体的不确定性;在跨域的资源预留时,需要明确独享和共享策略的一致性,独享和共享资源的方式混合使用会引发整体的不确定性;在应用端到端网络切片时,需要保障各个域的资源模式一致性,硬切片和软切片的混合使用也会引发整体的不确定性。

通过队列调度等实现跨域的确定性时,需要域间设备识别多种队列调度机制,在机制转换时考虑时间同步的差异、时间周期的切换,甚至协同基于同步和异步的队列调度机制^[46],跨域队列机制协同问题如图 4 所示。如图 4(a)所示,基于同步的 TAS 和 CQF 分别在不同的域间使用,在域间需要考虑时钟的偏差性,以及根据时钟同步的对齐周期考虑设置周期映射的偏移量;如图 4(b)所示,基于同步的 TAS 和异步的 ATS

分别在不同的域间使用,对于端到端确定性的挑战将会更大,需要进一步的研究。

2.3.3 面向算力网络的确定性

算力网络是近两年新兴发展的技术,是面向新基建、东数西算工程的进一步升级,通过网络和计算两大学科领域的深度交叉融合,推动各自领域以及融合领域的纵深发展,助力数字经济下的新型融合基础设施建设^[47-48]。算力网络面向更未来更新兴的场景,对网络和计算资源的要求进一步提高,需要一体化的融合发展来满足业务需求。算力网络的确定性不仅要保障网络的确定性,同时还对计算的确定性提出要求,实现一体化的确定性服务体验,在保障特定业务的确定性需求的同时,保障整个系统井然有序运行。

基于当前产业界算力网络的发展需求和技术研究^[49-50],笔者判断算力网络的确定性可以通过两种路径实现,面向算力网络的确定性如图 5 所示。一种是通过网络和计算领域各自优化,分别挑选所需资源保障确定性,如图 5(a)所示。确定性网络的技术如上文提到的包括资源隔离、队列调度、网络演算等方面,确定性计算的技术包括实时操作系统^[51]和线程锁等。面向高 SLA 的业务需求,可以分别挑选优质的网络和计算资源实现算力网络的确定性。这种方案的优势在于资源的确定性和独享性,劣势在于高成本和低灵活性,例如,面向移动性的场景可能无法动态匹配到相

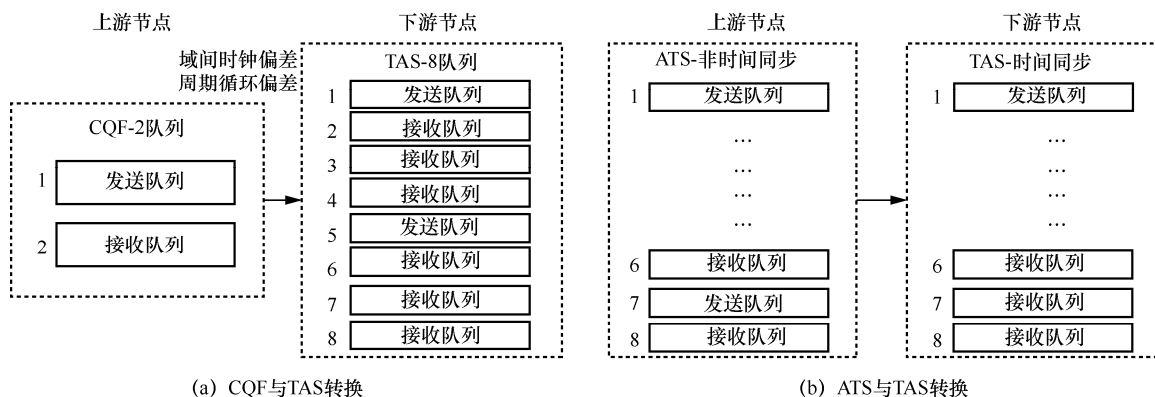
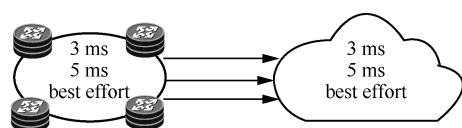


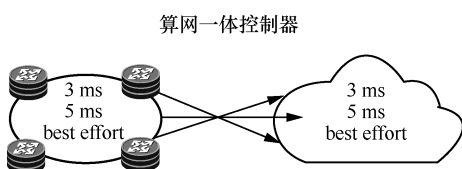
图 4 跨域队列机制协同问题



应的资源。另一种是通过网络与计算的联合考虑实现确定性，如图 5 (b) 所示。需要打通网络和计算的边界，例如，通过 RSVP 扩展至计算领域实现一体化资源预留，以及通过队列调度的扩展至线程排队机制实现一体化的调度等技术的结合。这种方案的优势在于灵活性和低成本性，劣势在于资源的隔离性和安全性不足。



(a) 网络的确定性“与/或”计算的确定性



(b) 网络与计算的联合确定性

图 5 面向算力网络的确定性

3 结束语

随着通信技术的提升以及产业的融合发展，确定性网络的需求和应用场景在不断地丰富，产业界对于确定性网络的实现路径也呈现多样化的趋势。通过进一步分析确定性网络的强弱性需求，以及确定性网络的科学性和工程性技术，可以更加清晰地梳理出面向不同业务的确定性网络服务提供方法。

确定性网络的核心技术标准已经发展成熟，面向更加广泛的应用等问题，需要结合强弱等确定性场景要求，通过解决确定性网络的科学性问题或工程性问题，进行严格的网络界限保障，或进行有效的网络优化，兼顾需求、性能、成本等多种因素的考虑，促进确定性网络的应用以及确定性服务理念推广。在面向 6G、算力网络的发展中，发挥核心引擎作用，共同助力信息智能化社会和经济的发展。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] IEC. Security for industrial automation and control systems: ISA/IEC 62443[S]. 2007.
- [3] 3GPP. System architecture for the 5G System (5GS): TS 23.501[S]. 2015.
- [4] 3GPP. Procedures for the 5G system (5GS): TS 23.502[S]. 2020.
- [5] 3GPP. Study on enhanced support of industrial Internet of things (IIoT) in the 5G system (5GS): TR 23.700-20[R]. 2021.
- [6] 3GPP. Study on 5GS DetNet interworking: TR 23.700-46[R]. 2022.
- [7] CLARKE L E, COOPER R B. Introduction to queueing theory[J]. The Mathematical Gazette, 1973, 57(401): 238.
- [8] CRUZ R L. A calculus for network delay. I. Network elements in isolation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.
- [9] CRUZ R L. A calculus for network delay. II. Network analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 132-141.
- [10] CHANG C S. Performance guarantees in communication networks[M]. London: Springer, 2000.
- [11] LE BOUDEC J Y, THIRAN P. Network calculus: a theory of deterministic queueing systems for the Internet[M]. Berlin: Springer, 2001.
- [12] MAO S W, PANWAR S S. A survey of envelope processes and their applications in quality of service provisioning[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(3): 2-20.
- [13] FIDLER M. Survey of deterministic and stochastic service curve models in the network calculus[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(1): 59-86.
- [14] 李焕忠. 基于随机网络演算的性能分析技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
LI H Z. Research on performance analysis technology based on stochastic network calculus[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [15] 张信明, 陈国良, 顾钧. 基于网络演算计算保证服务端到端延迟上界[J]. 软件学报, 2001, 12(6): 889-893.
ZHANG X M, CHEN G L, GU J. On the computation of end-to-end delay bound in guaranteed service by network calculus[J]. Journal of Software, 2001, 12(6): 889-893.

- [16] 张信明, 陈国良, 顾钧. 基于网络演算的流量整形模型[J]. 软件学报, 2002, 13(12): 2225-2230.
- ZHANG X M, CHEN G L, GU J. A traffic shaping framework based on network calculus[J]. *Journal of Software*, 2002, 13(12): 2225-2230.
- [17] WATSON K, JASPERNEITE J. Determining end-to-end delays using network calculus[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2003, 36(13): 251-256.
- [18] THIRAN P, LE BOUDEC J Y, WORM F. Network calculus applied to optimal multimedia smoothing[C]//*Proceedings of Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213)*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1474-1483.
- [19] JIANG Y M, LIU Y. Stochastic network calculus[M]. London: Springer, 2008.
- [20] WANG G C, WANG N, LAI M X. An end-to-end delay bound based on stochastic network calculus in wireless mesh network[C]//*Future Wireless Networks and Information Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 235-242.
- [21] LIN C T, WU C M, HUANG M, et al. Performance evaluation for SDN deployment: an approach based on stochastic network calculus[J]. *China Communications*, 2016, 13(Supplement 1): 98-106.
- [22] WU Z T, HUANG N, WANG X W, et al. Analysis of end-to-end delay on AFDX based on stochastic network calculus[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 168-172.
- [23] WANG K, CIUCU F, LIN C, et al. A stochastic power network calculus for integrating renewable energy sources into the power grid[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(6): 1037-1048.
- [24] RIDOUARD F, SCHARBARG J L, FRABOUL C. Stochastic network calculus for end-to-end delays distribution evaluation on an avionics switched Ethernet[C]//*Proceedings of 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 559-564.
- [25] WANG K, LOW S, LIN C. How stochastic network calculus concepts help green the power grid[C]//*Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart Grid Comm)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 55-60.
- [26] FIDLER M. An end-to-end probabilistic network calculus with moment generating functions[C]//*Proceedings of 2006 14th IEEE International Workshop on Quality of Service*. Piscataway: IEEE Press, 2006: 261-270.
- [27] AYYORGUN S, CRUZ R L. A service-curve model with loss and a multiplexing problem[C]//*Proceedings of 24th International Conference on Distributed Computing Systems*, 2004. *Proceedings*. Piscataway: IEEE Press, 2005: 756-765.
- [28] GULYAS A, BIRO J. A stochastic extension of network calculus for workload loss examinations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(5): 399-401.
- [29] AGHAREBPARAST F, LEUNG V C M. A novel stochastic min-plus system theory approach for performance modeling and cross-layer design of wireless fading channels[M]. In *In Proceeding Het-Nets*. 2006.
- [30] YU B Z, CHI X F, SUN H L. Bandwidth abstraction and instantiation under closed-loop latency constraint for tactile slice based on martingale theory[J]. *Computer Communications*, 2020, 160: 274-283.
- [31] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks - enhancements for scheduled traffic: 802.1Qbv[S]. 2015.
- [32] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks amendment: asynchronous traffic shaping: 802.1Qcr[S]. 2020.
- [33] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks - cyclic queuing and forwarding: 802.1Qch[S]. 2015.
- [34] 莫益军, 杨子涵, 刘辉宇, 等. 面向大规模确定性网络的全局循环排队与转发机制[J]. *电信科学*, 2021, 37(10): 55-65.
- MO Y J, YANG Z H, LIU H Y, et al. Global cyclic queuing and forwarding mechanism for large-scale deterministic networks[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(10): 55-65.
- [35] 张彤, 冯佳琦, 马延滢, 等. 时间敏感网络流量调度综述[J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(4): 747-764.
- ZHANG T, FENG J Q, MA Y Y, et al. Survey on traffic scheduling in time-sensitive networking[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(4): 747-764.
- [36] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术[J]. *电信科学*, 2019, 35(9): 12-19.
- QIANG L, LIU B Y, YU D L, et al. Large-scale deterministic network forwarding technology[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(9): 12-19.
- [37] TAN W Q, WU B W, WANG S, et al. Large-scale deterministic transmission among IEEE 802.1Qbv time-sensitive networks[C]//*Proceedings of ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2315-2320.
- [38] TAN W Q, WU B W. Long-distance deterministic transmission among TSN networks: converging CQF and DIP[C]// *Proceedings of 2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

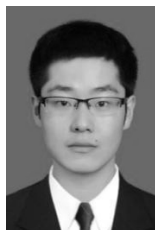


- [39] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks - forwarding and queuing enhancements for time-sensitive streams: 802.1Qav[S]. 2009.
- [40] IETF. Resource reservation protocol (RSVP): RFC2205[S]. 1997.
- [41] IETF. RSVP-TE: extensions to RSVP for LSP tunnels: RFC3209[S]. 2001.
- [42] IEEE. Virtual bridged local area networks amendment 14 stream reservation protocol (SRP)[S]. 2010.
- [43] IETF. Deterministic networking architecture: RFC 8655[S]. 2019.
- [44] IETF. Requirements for traffic engineering over MPLS: RFC2702[S]. 1999.
- [45] SHI H, CUI Y, QIAN F, et al. DTP: deadline-aware transport protocol[C]//Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Workshop on Networking 2019. New York: ACM Press, 2019.
- [46] LIU P, LI Y Z, ECKERT T, et al. Requirements for scaling deterministic networks[R]. 2023.
- [47] China Mobile. Computing force network white paper[R]. 2021.
- [48] 段晓东. 中国移动算力网络推动“东数西算”工程向纵深发展[J]. 通信世界, 2022(5): 20-21.
- DUAN X D. China mobile computing network promotes the “east counting and west computing” project to develop in depth[J]. Communications World, 2022(5): 20-21.
- [49] 段晓东, 姚惠娟, 付月霞, 等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 76-85.
- DUAN X D, YAO H J, FU Y X, et al. Computing force network technologies for computing and network integration evolution[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 76-85.
- [50] 姚惠娟, 陆璐, 段晓东. 算力感知网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 7-11.
- YAO H J, LU L, DUAN X D. Architecture and key technologies for computing-aware networking[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(3): 7-11.
- [51] 季志均, 马文丽, 陈虎, 等. 四种嵌入式实时操作系统关键技术分析[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(9): 4-8.
- JI Z J, MA W L, CHEN H, et al. Analysis of key techniques based on four embedded real-time operating systems[J]. Application Research of Computers, 2005, 22(9): 4-8.

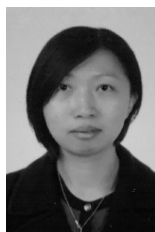
[作者简介]



段晓东 (1977-), 男, 中国移动通信有限公司研究院副院长、教授级高级工程师, 主要研究方向为算力网络、6G 网络架构、下一代互联网、4G/TD-LTE 网络、5G 网络架构设计与核心技术等。



刘鹏 (1991-), 男, 中国移动通信有限公司研究院工程师, IETF CATS 工作组主席, 主要研究方向为下一代互联网 IP 技术、确定性网络、算力网络及算网一体前沿技术和应用。



陆璐 (1979-), 女, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所副所长、高级工程师, 主要研究方向为移动核心网、未来 IP 网络、算力网络及算网一体新技术。



孙滔 (1981-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院正高级工程师, 主要从事 5G 演进技术、6G 网络架构、未来网络、算力网络新技术研究工作。



李志强 (1987-), 男, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所未来网络室主任, 主要研究方向为下一代 IP 网络、算力网络、可编程网络、确定性网络等。