



研究与开发

面向垂直行业专网的确定性SLA指标分级研究

张沐风¹, 李洪星¹, 王柯², 李晓良³, 刘雅琼¹, 胡怡红¹, 寿国础¹

(1. 北京邮电大学, 北京 100876;

2. 中国信息通信研究院, 北京 100083;

3. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘要: 以经济有效的方式满足不同行业客户差异化的确定性服务质量体验, 有利于推进垂直行业确定性专网建设。面对多种细分行业不同维度的确定性服务质量需求, 服务等级协议 (service level agreement, SLA) 指标的分类分级十分重要。首先总结了垂直行业中多种类型确定性服务的应用场景, 并对各类型业务进行了指标需求分析。然后, 提出了确定性SLA指标体系并总结了各指标的分级设计方案, 解决当前网络SLA指标对于确定性属性体现不足的问题, 帮助降低行业客户和服务提供商之间的指标理解对齐难度, 使得网络能契合不同行业的确定性服务需求。最后, 对未来的工作进行了展望。

关键词: 服务等级协议; 5G; 时间敏感网络; 确定性网络; 工业互联网

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024182

Deterministic service level agreement: indicator classification in private networks for vertical industry

ZHANG Mufeng¹, LI Hongxing¹, WANG Ke², LI Xiaoliang³, LIU Yaqiong¹,
HU Yihong¹, SHOU Guochu¹

1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100083, China

3. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

Abstract: Meeting the differentiated deterministic service quality experience of customers in different industries in an economically effective manner is conducive to promoting the construction of a vertical industry deterministic private network. In the face of various segmented industries and different dimensions of deterministic service quality requirements, the classification and grading of SLA(service level agreement) indicators are very important. Firstly, various types of application scenarios of deterministic service in vertical industries were summarized, and indicator requirements analysis was conducted for each type of business. Then, a deterministic SLA indicator system was proposed

收稿日期: 2024-04-19; 修回日期: 2024-06-15

通信作者: 王柯, wangke@caict.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFC3803700)

Foundation Item: The National Key Research&Development Program of China (No.2022YFC3803700)



and a hierarchical design scheme for each indicator was summarized to solve the problem of insufficient reflection of deterministic attributes in current network SLA indicators, and help reducing the difficulty of understanding and aligning indicators between industry customers and service providers, and enable the network to meet the deterministic service needs of different industries. Finally, prospects for future work were presented.

Key words: SLA, 5G, TSN, DetNet, industrial Internet

0 引言

随着我国的网络体系强基行动、产业数字化转型稳步推进,支持确定性服务的网络技术赋能垂直行业已成为重要发展趋势。在政策方面,2020年12月,工业和信息化部发布《工业互联网创新发展行动计划(2021—2023年)》,明确提出“推进企业内网升级”“开展企业外网建设”“探索云网融合、确定性网络、IPv6分段路由(SRv6)等新技术部署”^[1]。2021年12月发布的《国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知》中,明确提出“加快企业数字化转型升级”^[2]。在技术方面,时间敏感网络(time sensitive network, TSN)、确定性网络技术是当前研究的重点,科技部分别在2020年的“宽带通信和新型网络”“网络协同制造和智能工厂”,2021年的“多模态网络与通信”“工业软件”,2022年的“多模态网络与通信”等重点专项中都将TSN、确定性网络技术作为重点技术进行支持。在标准方面,2020年7月,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP) Release-16(Rel-16)宣布完成,针对垂直行业的需求对5G核心网进行了大量的能力拓展,通过引入5G局域网(5G local area network, 5G LAN)、TSN、非公共网络(non-public network, NPN)等关键能力增强5G通信对垂直行业和局域网服务的支持^[3]。在3GPP Rel-17和Rel-18中,提出引入内生确定性来增强5G核心网架构,确立5G系统的时间敏感通信(time sensitive com-

munication, TSC)机制并进行标准化^[4-5]。在产业应用方面,随着工业生产等诸多行业向智能化、网络化、数字化发展,许多业务场景对端到端传输时延、抖动、可靠性等指标提出更加严格的要求,网络确定性服务对工业应用尤为重要^[6-8]。由于工业互联网业务场景复杂,新应用不断涌现,需求复杂多样,网络的构建需要打破传统消费、办公和生产业务的边界,尽管5G网络相比传统网络在确定性上有所提高,但面对超高要求的工业场景如产线设备控制、精密仪器制造、机器人控制、数字孪生等时,仍然存在严峻的挑战^[9]。需要通过引入确定性技术来实现对高精度业务的支持,促进产业从规模化生产、提供产品、专业分工、传统制造向定制化生产、产品服务化、一体化生产、智能化生产转型升级^[10-11],提升产品服务附加值,推动行业发展创新。

与传统的“尽力而为”网络架构不同,确定性网络的理念是打造可预期、可规划、可验证、有确定性能力的移动专网,实现差异化(differentiated)网络^[12]。差异化网络是行业数字化的关键诉求,包括给不同客户提供差异化体验以及确定性的服务等级协议(service level agreement, SLA)保障^[13]。

SLA起源于一些大企业客户对服务质量(quality of service, QoS)的重视,是两个组织之间谈判达成的正式商业合同的一个要素,即一个组织扮演服务提供商(service provider, SP)角色,另一个组织充当客户角色。SLA记录了对产品各个方面的共同理解,以及从产品订购到合同

终止这两个组织的角色和责任,包括由SP向客户提供一个或多个面向客户的服务,其主要目的是制定SP方面的服务级别承诺规范。SP负责开发具有SLA相关参数的业务,满足客户购买的服务质量等级要求。客户则基于SLA接受SP提供的服务。

5G确定性网络产业联盟(5G deterministic networking alliance, 5GDNA)工业化联网小组调研显示,71%的工业园区各场景的SLA/QoS需求差异明显^[14]。面对上百种细分行业不同维度的服务质量需求,为实现定制服务可承诺的确定性SLA保障^[15],SLA需求采集、精确度量十分重要。

本文进行了面向垂直行业专网的确定性SLA指标分级研究。

1 垂直行业的确定性应用场景及需求分析

1.1 应用场景

随着5G向以工业互联网为代表的垂直行业赋能拓展的趋势发展,确定性技术需求在垂直行业的覆盖范围正在逐步扩大中,不断渗透生产制造的各个环节。工业互联网确定性网络是典型的跨行业、跨学科重点应用技术。

智慧工厂通过利用机械臂和移动机器人替代人力,执行重复性、高危、高精度任务,营造高度自动化和灵活性的环境,实现智能制造的数字化转型。智慧工厂内自动控制类业务较多,确定性传输技术是提升效率和安全性的关键。凭借高带宽、低时延和高可靠性通信,实现PLC之间及其与厂内系统之间的数据传输,减少有线连接,支持远程控制和协作搬运等关键业务。除此之外,还保障大规模设备协同需求,实现跨产线、跨车间的多设备协同生产^[16]。

在智慧电网的配电和用电阶段,由于节点数量庞大、分布分散,通信网络的覆盖率很低。电网中的智能分布式馈线自动化、低压配电系

统的信息采集、毫秒级精确负载控制、电力系统差动保护、分布式电源调控等配电和用电阶段的核心业务场景^[17],对网络的确定性、实时性、可靠性以及终端连接数等提出了极高的要求。

在煤矿行业,传统采矿方式生产环境恶劣、安全事故频发。结合确定性技术的低时延、低抖动等保障能力,可实现高可靠、低时延的工程机械远程控制,满足智慧矿山的巡检、安防、无人驾驶、智能采掘、环境监测和虚拟交互等需求,助力打造“云-边-端”的矿山工业互联网体系架构^[16,18]。

在钢铁行业,同样也面临从“制造”到“智造”的转型挑战。中国移动等发布的《5G智慧钢铁白皮书》强调了智慧钢铁无线替换有线、机器替人、连接未连接的应用价值^[19]。为应对这一挑战,需要低时延、高带宽、移动性强的新方案赋能钢铁企业生产网络,降低有线组网损耗,满足柔性生产的需要。

在交通行业,随着汽车工业的发展,汽车的智能化已经成为必然趋势,车载网络需要满足各类车载系统的承载和互联要求。在智慧列车领域,下一代列车通信网络也在向高带宽、高安全性、无线化、运维智能化的方向发展,以满足自动运行、虚拟编组、智能运维等场景下的高性能要求。

在医疗行业,为解决我国医疗资源分配不均的问题,实现优质医疗资源共享下沉,构建智能化的高效医疗服务体系,需要大带宽、低时延、高可靠的网络为超高清医学影像提供实时传输保障,并支持开展远程操控类业务,为解决医疗行业痛点提供有效助力。

在港口行业,仍然面临港口机械远控类业务低时延高可靠交互要求高、视频类业务上行带宽要求高等技术痛点,因此需要引入确定性网络方案,满足港口应用场景独特的带宽、时延等性能



要求, 在提高港口生产的作业效率和自动化水平的同时, 也能够大大降低港口大型机械的改造成本。

除上述行业外, 在航天电子设备、智能物流、远程教育等应用领域, 业务形态都在向数字化、网络化、智能化转型升级。确定性技术在端到端时延、通信服务可靠性、抖动的确定性方面有严格要求, 将形成新的低时延低抖动的确定性传输方案, 以实现确定性业务承载的最终目标。对各行业确定性应用场景做了业务总结和分类, 垂直行业确定性应用场景如图1所示, 可以归纳为远程设备控制、高清视频传输、信息采集监测、核心生产环节、辅助生产环节等不同业务类型。

1.2 需求分析

在确定性网络指标层面, 不同行业不同类型的业务需求呈现差异性。时间同步精度方面, 一些工业应用程序会对终端节点提出时间同步要求, 智慧电网的核心控制环节, 如电流差动保护、相量测量场景, 也要求其通道必须是时间同步的。带宽方面, 基于高清视频传输的远程监

测、交互、质检类型业务, 以及终端密集型的大规模连接远控、巡检等业务, 提出了超高的上行大带宽需求。而远程操控、机器人等控制类业务, 以及信息采集监测等支撑类业务, 虽然终端接入数比较庞大, 但是传输的控制类信令等数据量并不大, 上下行带宽要求均不高。时延方面, 对于涉及精准控制的生产核心类应用、发挥保护作用的安全应用等, 这类应用时延敏感性较强, 需要控制端快速对受控端发送的状态信息进行分析判断并做出决策、发送指令, 受控端接收指令完成动作, 以实现精准调控、故障修复等功能, 在这个过程中, 交互信息的传输时延要求达到几十毫秒甚至毫秒级别。而在一些事件触发相对缓慢或者可以提前预期的场景中, 指标需求不会偏向低时延。时延抖动方面, 某些特殊的高精度应用场景会对有界的抖动提出要求, 如智慧电网的电流差动保护、钢铁行业中的无人天车远程控制等。可靠性方面, 在工业生产中, 为保障设备精准控制, 对网络传输的可靠性要求极高。在车联网领域, 出于定位难度高、动作精细程度高等考虑, 对远程自动泊车等业务提出了非常高的可靠

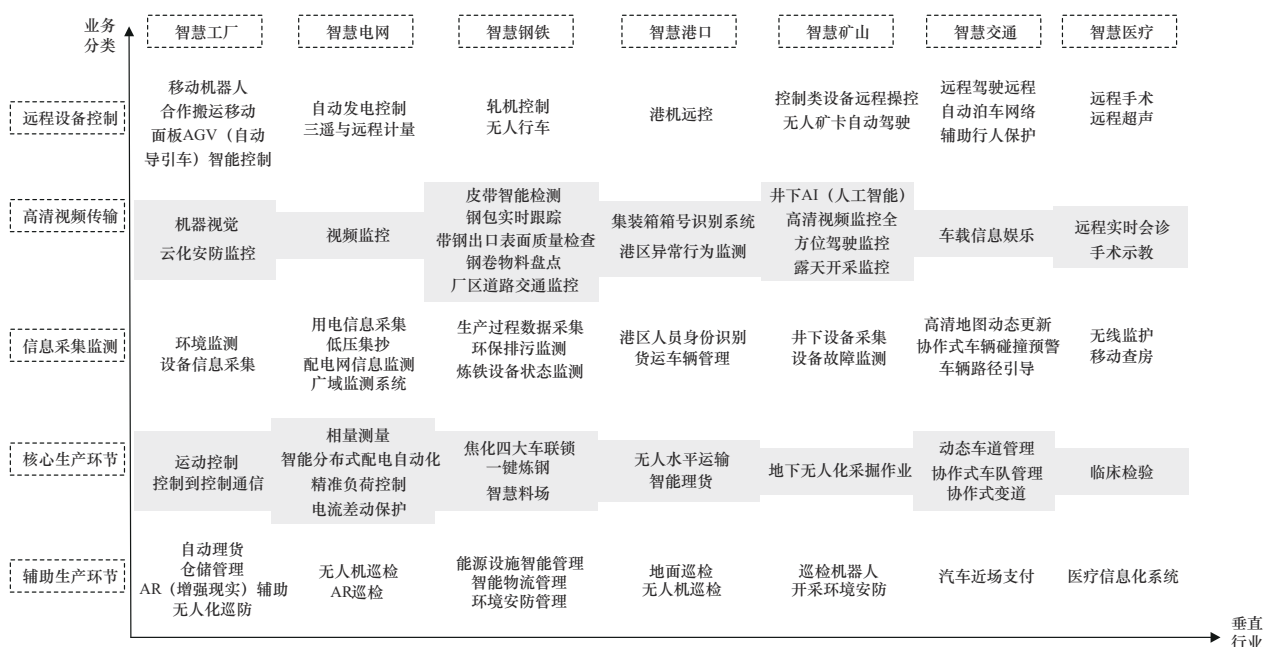


图1 垂直行业确定性应用场景

性要求。而对于一些高带宽的外围服务类应用，如视频监控，终端多为摄像头形式，对可靠性要求不高。

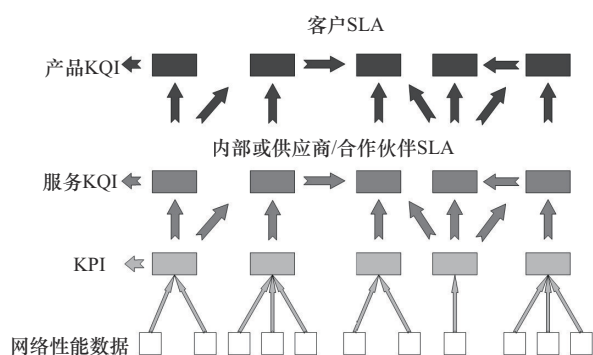
对各类型业务的网络指标需求与特点进行了总结。确定性业务网络指标需求总结见表 1，远程设备控制类应用对低时延、高可靠性的需求显著，高清视频传输类应用对上行带宽提出了高要求，信息采集监测类应用对各指标的要求一般，核心生产环节类应用对低时延、高可靠性提出了高要求，并有一定的授时需求，辅助生产环节类应用有一定的时延、带宽、可靠性需求。对于不同需求的业务类型，在落地实现环节就可以针对其需求特点提出相应的网络方案。

2 确定性 SLA 指标体系

服务提供商（SP）根据一组以业务为中心的关键绩效指标（key performance indicator, KPI）来报告其网络的性能。KPI 用于衡量服务的性能，对 SP 有意义，但对客户不一定有意义^[24]。此时就需要引入对关键质量指标（key quality indicator, KQI）的考查。服务 KQI 侧重于监视单个产品组件的性能，被用作 SP 内部或供应商/合作伙伴 SLA 管理的主要输入。而后，产品 KQI 聚合多个服务 KQI 的数据源，以此支持与客户的契约性 SLA。关键指标层次结构如图 2 所示，SP 通过这一指标映射过程，实现通过网络性能数据度量客户 SLA 服务质量等的过程。

表 1 确定性业务网络指标需求总结

业务类型	典型应用	时间同步	带宽	时延	时延抖动	可靠性	需求特点
远程设备控制	运动控制 ^[20]	900 ns	16 Mbit/s	0.5~2 ms	1 μs	99.9999%	时延、抖动、可靠性要求高
	无人天车	—	上行：50 Mbit/s； 下行：10 Mbit/s	20 ms	5 ms	99.99%	
高清视频传输	远程自动泊车 ^[16]	—	30 Mbit/s	5~30 ms	—	99.999%	上行带宽要求高
	云化安防监控（4路 4K 高清） ^[21]	—	上行：100 Mbit/s	50 ms	5 ms	99.9%	
	机器视觉质量检测	—	上行：100 Mbit/s； 下行：20 Mbit/s	100 ms	—	99.9%	
信息采集监测 ^[22]	手术示教 ^[22]	—	上行：20 Mbit/s	50 ms	—	99.9%	总体要求不高
	设备信息采集	—	200 kbit/s	50 ms	—	99.99%	
	用电信息采集	—	10~100 kbit/s	0.5~5 s	—	一次采集成功率≥97%； 遥控正确率≥99.99%	
核心生产环节	环境监测	—	200 kbit/s	50 ms	—	99.99 %	时延、可靠性要求高，有授时需求
	电流差动保护 ^[23]	10 μs	64 kbit/s	5 ms	250 μs	丢包率<0.1%	
	精准负荷控制 ^[22]	10 μs	10 kbit/s~2 Mbit/s	200 ms	—	99.999%	
辅助生产环节	相量测量 ^[21]	1 μs	2 Mbit/s	5~10 ms	—	99.999%	有一定时延、带宽、可靠性需求
	智能巡检	—	上行：2K：6 Mbit/s； 4K：16 Mbit/s； 下行：5 Mbit/s	100 ms	—	99.99%	
	无人水平运输	—	10~20 Mbit/s(单车)	15~50 ms	—	99.99%	
	智能理货	—	上行：4 Mbit/s(每路)	150 ms	—	99%	

图2 关键指标层次结构^[25]

SLA定义网络服务性能指标时，至少要遵循以下原则：

- (1) 客观、可重复，用明确的数据测量；
- (2) 对客户和SP了解他们体验或提供的性能有用；
- (3) 对由一种网络技术支持的服务不表现出与另一种技术相反的偏见；
- (4) 能够通过SP、客户以及第三方可接受的过程独立测量，避免引入人为指标。

在上述原则的指导下，许多大型运营商和标准组织都制定了自己的SLA指标体系：3GPP首提《5G管理：SLA管理及增强》项目；全球移动通信系统协会（Global System For Mobile Communications Association, GSMA）联合主导《Official Document NG.116 - Generic Network Slice Template》的制定，从行业的角度制定网络指标，定义了描述网络服务类型的35种属性，是目前最为全面的SLA指标体系^[26]；国际电信联盟（International Telecommunications Union, ITU）主导制定端到端SLA保障架构；中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）首次在行业内制定更适合国内行业的SLA指标及保障体系，《5G端到端切片SLA行业需求研究》从业务可用、安全可信、自主可控3个维度定义了网络可用度、用户带宽、时延、包可靠、定位准确度、授时精度、网络安全、隔离度、可视、可管、可运营11个指标；IMT-2020

（5G）推进组发布的《面向垂直行业的5G本地SLA需求及保障能力白皮书》主要定义网络层SLA指标，重点考虑用户体验数据速率、端到端时延、包可靠性、网络可用度、定位精确性等指标。但是截至目前，SLA指标体系仍无统一标准。

其中，时延、抖动、速率等指标是行业客户关心的指标，也是典型的确定性网络QoS指标。这些指标可以直观地反映出网络服务性能等级，满足客户对于SLA可视化的需求，对行业确定性专网的商用起着非常重要的作用。本文将就以下指标展开讨论。

（1）时间同步精度

时间同步精度指同步主机和任何同步设备之间在同步域内允许的最大时间偏移，用作时钟同步服务的KPI。时钟同步服务，是指调整独立用户终端时钟的服务^[19]。

（2）带宽

带宽指保证用户体验的最低数据速率。分为上行带宽和下行带宽，在工业自动化场景中，多数应用更重视上行带宽需求。在实际测量的过程中，其定义为每个观察粒度期间成功接收/发送的上行/下行IP数据包的总大小^[26-27]。

（3）时延

时延指将某一信息从源头传输到目的地所需的时间，在通信接口处测量，从源头传输到目的地成功接收的那一刻所需的时间。确定性网络主要关注端到端时延的确定性保障。

（4）时延抖动

时延抖动指时延期望值与实际值之间存在的偏差值，在确定性网络中，承诺的抖动是更加严格的有界抖动。抖动的参考测量方法有包时延分布法、包时延偏差法、标准差法、差值法等。

（5）可靠性

可靠性可以指包可靠性，即在网络层分组传输中，数据包能够在目标服务所需的时间限制内

成功传递到给定系统实体的能力，它通常以成功传递的数据包占有所有传输数据包的百分比来衡量，并且与丢包率呈负相关关系，即包可靠性越高，丢包率越低；也可以指通信服务可靠性，即在给定的条件下，通信服务在给定的时间间隔内按要求执行的能力，可以使用适当的衡量标准进行量化，例如平均无故障时间，或在指定时间段

内无故障的概率^[28]。可靠性还可以用通信服务可用性度量，即按照规定的服务质量提供端到端通信服务的时间除以系统预计提供端到端服务的时间的百分比值^[29]。

在具体落地应用时，针对不同的需求和场景，每个指标有不同的衡量方式。确定性 SLA 指标不同衡量方式的定义及计算式见表 2。

表 2 确定性 SLA 指标不同衡量方式的定义及计算式

SLA 指标	计算式	备注
时间 同步 精度 ^[30]	时间误差 (TE) $TE = T(t) - T_{\text{ref}}(t)$	(1) 时间误差 (time error, TE)，指一台时钟 $T(t)$ 相对于参考时钟 $T_{\text{ref}}(t)$ 之间的时间差值，用于衡量时间的准确性
	最大时间 间隔误差 (MTIE) $MTIE(n\tau_0) \cong \max_{1 \leq k \leq N-n} [\max_{k \leq i \leq k+n} x(i) - \min_{k \leq i \leq k+n} x(i)]$	(2) 最大时间间隔误差 (maximum time interval error, MTIE) 被定义为时钟与理想基准之间的最大时间差减去最小时间差，用于衡量时间的稳定性
	艾伦偏差 (ADEV) $\sigma_y(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{2n^2 \tau_0^2 (N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2}$	(3) 艾伦偏差 (Allan deviation, ADEV) 是一种双样本方差艾伦方差的平方根，用于衡量时钟、振荡器和放大器的频率稳定度
带宽 上行平均 速率	$\frac{\sum_{i=1}^{\#NRCelIDU} W}{\sum_{i=1}^{\#NRCelIDU} \frac{W}{DRB.UETpUI}}$	(4) 上行平均速率指用户总上行传输数据量与用户总上行传输时间的比值。 $\#NRCelIDU$ 指子网络内物理小区的数量， W 指用于加权平均的权重，它可以是 NR 小区的上行数据量，也可以是该 KPI 的消费者所定义的权重， $DRB.UETpUI$ 指的是终端的平均上行吞吐量，它的计算方式可以参考 3GPP TS 28.552
下行平均 速率	$\frac{\sum_{i=1}^{\#NRCelIDU} W}{\sum_{i=1}^{\#NRCelIDU} \frac{W}{DRB.UETpDI}}$	(5) 下行平均速率指用户总下行传输数据量与用户总下行传输时间的比值。 $\#NRCelIDU$ 指子网络内物理小区的数量， W 指用于加权平均的权重，它可以是新空口 (new radio, NR) 小区的下行数据量，也可以是该 KPI 的消费者所定义的权重， $DRB.UETpDI$ 指的是终端的平均下行吞吐量，它的计算方式可以参考 3GPP TS 28.552
上行实际 速率	$\frac{\sum ThpVolUI}{\sum ThpTimeUI}$	(6) 上行实际速率指单用户上行传输数据量与上行传输时间的比值。 $ThpTimeUI$ 指发送数据包的时间，一个 $ThpTimeUI$ 的采样时间为每次数据无线承载 (data radio bearer, DRB) 的上行缓冲区清空的时间。 $ThpVolUI$ 指突发数据量，一个 $ThpVolDI$ 的采样为一个上行 DRB 在一个 $ThpTimeDI$ 采样周期内成功发送的数据量
下行实际 速率	$\frac{\sum ThpVolDI}{\sum ThpTimeDI}$	(7) 下行实际速率指单用户下行传输数据量与下行传输时间的比值。 $ThpTimeDI$ 指发送数据包的时间，一个 $ThpTimeDI$ 的采样时间为每次 DRB 的下行缓冲区清空的时间。 $ThpVolDI$ 指突发数据量，一个 $ThpVolDI$ 的采样为一个下行 DRB 在一个 $ThpTimeDI$ 采样周期内成功发送的数据量



续表

SLA 指标	计算式	备注
时延 端到端平均上行时延	$\frac{\sum_{EP_N3} \left(\frac{GTP.DelayUIPsaUpfUeMean}{Wn3} \right) + \sum_{EP_N9} \left(\frac{GTP.DelayUIPsaUpfUeMean}{Wn9} \right)}{\sum_{EP_N3} Wn3 + \sum_{EP_N9} Wn9} \quad (8)$	端到端平均上行时延指从用户设备 (user equipment, UE) 调度上行链路 (uplink, UL) 无线链路控制 (radio link control, RLC) 服务数据单元 (service data unit, SDU) 到 PDU 会话锚点 (PDU session anchor, PSA) 用户平面功能 (user plane function, UPF) 接收到相应的 GPRS 隧道协议 (GPRS tunneling protocol, GTP) 协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 的加权平均数据包时延 GTP.DelayUIPsaUpfUeMean 指 PSA UPF 和 UE 之间的平均上行数据包延迟, Wn3 可以是 PSA UPF 在 N3 接口上接收的上行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重, Wn9 可以是 PSA UPF 在 N9 接口上接收的上行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重
端到端平均下行时延	$\frac{\sum_{EP_N3} \left(\frac{GTP.DelayDIPsaUpfUeMean}{Wn3} \right) + \sum_{EP_N9} \left(\frac{GTP.DelayDIPsaUpfUeMean}{Wn9} \right)}{\sum_{EP_N3} Wn3 + \sum_{EP_N9} Wn9} \quad (9)$	端到端平均下行时延指从 PSA UPF 发送 GTP PDU 到 UE 接收到相应的 RLC SDU 的加权平均数据包时延。GTP.DelayDIPsaUpfUeMean 指 PSA UPF 和 UE 之间的平均下行数据包时延, Wn3 可以是 PSA UPF 在 N3 接口上传输的下行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重, Wn9 可以是 PSA UPF 在 N9 接口上传输的下行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重
端到端平均往返时延	$\frac{\sum_{EP_N3} \left(\frac{GTP.DelayPsaUpfUeMean}{Wn3} \right) + \sum_{EP_N9} \left(\frac{GTP.DelayPsaUpfUeMean}{Wn9} \right)}{\sum_{EP_N3} Wn3 + \sum_{EP_N9} Wn9} \quad (10)$	在 PSA UPF 和下一代无线接入网 (next generation radio access network, NG-RAN) 时间不同步的情况, 端到端平均上行时延和端到端平均下行时延默认相同。TP.DelayPsaUpfUeMean 指 PSA UPF 和 UE 之间的平均往返时延, Wn3 可以是 PSA UPF 在 N3 接口上接收/传输的上/下行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重, Wn9 可以是 PSA UPF 在 N9 接口上接收/传输的上/下行 GTP PDU 数据量/数目, 也可以是由 KPI 消费者定义的权重
时延 包时延分布抖动	—	定义可接受的最大端到端时延 t_U 和最小端到端时延 t_L , 时延确定性由计算端到端时延大于 t_U 和小于 t_L 的样本占比得到
包时延偏差法	$\text{上抖动偏差: } S_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - t_U)^2}{m}} \quad (11)$ $\text{下抖动偏差: } S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - t_L)^2}{n}} \quad (12)$	定义区间 $[t_L, t_U]$ 内到达的数据包是及时接收的, 在该区间之外到达的数据包则认为时延不可接受, 进一步可得到上/下抖动偏差。根据在所有时延采样中得到 m 个时延大于 t_U 的上抖动采样 $U_1, U_2, \dots, U_m$, 可以计算出上抖动偏差; 同理, 根据在所有时延采样中得到 n 个时延小于 t_L 的下抖动采样 $L_1, L_2, \dots, L_n$, 可以计算出下抖动偏差
标准差法	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (13)$	根据 N 个上报的时延 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 采样计算标准差, 标准差越小则抖动越小
差值法	$\frac{\sum_{i=2}^N (D_i - D_{i-1})}{N-1} \quad (14)$	采集抽样包从发送诊断包到成功接收对应响应诊断包的时延 $D_1, D_2, \dots, D_n$, 然后统计相邻抽样包的时延差值的绝对值, 最后对一个统计周期内的时延差值做统计平均
可靠性 包可靠性	包可靠性 = $1 - \text{PacketLossRate}$ (15)	PacketLossRate 即丢包率, 丢包率为目标不能接收的网络层数据包的数量与已发送网络层数据包的总数量的比值, 其中目标不能接收的网络层数据包, 包括由于高流量负载或流量管理不能发送给目标的网络层数据包, 以及在传输中丢失的网络层数据包和接收的格式错误的网络层数据包

续表

SLA 指标	计算式	备注
平均无故障时间	$MTBF = \frac{\sum t}{N}$	(16) 平均无故障时间 (mean time between failures, MTBF) 是通信服务可靠性的典型指标之一。其中 $\sum t$ 为累计运行时间, N 为该期间内故障次数。此参数表示通信服务在变为不可用之前的可用时间的平均值。例如, 一个月的平均故障间隔时间表示, 在一个或多个错误使通信服务不可用之前, 通信服务平均无错误运行一个月。如果两个后续错误之间的时间低于平均值, 将出现多个故障
通信服务可用性	可用性 = $\frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	(17) 式 (17) 中, MTBF 同式 (16) 中的 MTBF, 指平均无故障时间, MTTR 指平均故障修复时间 (mean time to repair)。通信服务可用性与可靠性的细微差别在于, 通信服务可用性中, “端到端” 中的终点是通信服务接口, 而可靠性的端点为网络节点

3 确定性 SLA 指标分级

在 SP 的角度, 建立一个明确的 SLA 指标分类体系有助于 SP 更深入地了解各行业的用户需求, 制定出更合适、质量更高的服务, 同时, SP 可以根据不同的 SLA 类别定制不同价位的服务, 既满足了行业客户的多样化需求, 也降低了运营成本; 在行业客户角度, 明确的 SLA 分类有助于他们理解 SP 提供的通信服务能力、选择相匹配的服务等级并利用好相应服务, 降低了行业间的沟通壁垒; 对于政策监管部门来说, SLA 分类体系提供了规范化指标和行业标准, 为行业数字化的量化方案提供了决策参考, 有助于相关部门分析产业短板并调整发展方向。总体而言, SLA 是通信技术在垂直行业中发挥应用价值的沟通桥梁, 有助于推动服务商满足千行百业的网络需求并实现规模化商业运营^[22,31]。

目前行业内尚无关于 SLA 分级的统一标准, 各个标准组织都在积极推进相关研究工作: 中国信息通信研究院《5G 端到端切片 SLA 行业需求研究》结合业界常用的 SLA 相关标准, 定义了行业联接 SLA 需求的马斯洛模型, 从业务可用、安全可信、自主可控 3 个维度描绘了行业 SLA 需求的分级体系, 并形成了 5G 切片 SLA 分级调色板; IMT-2020 (5G) 推进组《5G 确定性承载网络 SLA 指标体系白皮书》依据确定性业务承载指

标, 结合业务应用范围和网络传输距离等因素, 综合确定了 5G 确定性承载 SLA 指标的分级; 中国联通等单位制定的《面向工业互联网的 5G 服务等级协议 (SLA) 智能保障平台总体技术要求》针对 5G+工业场景, 对网络可用度、时延、包可靠性、上行/下行用户速率、定位准确度、时钟同步精度、网络隔离等指标进行了 SLA 分级设计; 中兴通讯基于多样化的业务需求, 为增强确定性网络 (enhanced deterministic network, EDN) 提出了确定性的分类分级及其 SLA 指标, 将网络中确定性业务分为 5 个 QoS 等级, 分别对应带宽保障类、有界时延上限保障类、低时延保障类、低抖动保障类、低时延低抖动保障类业务^[32]。

本节参考已有的 SLA 分级设计, 总结了确定 SLA 指标的典型分级方案, 以及相对应的应用场景以及支撑技术。

(1) 时间同步精度

随着未来社会走向“万物互联”, 全产业都在向数字化转型升级, 时间同步将成为数字化社会的基础。对精确可靠的同步需求正在迅速增加, 覆盖智慧工厂、智能电网、数字交通、医疗、证券交易等行业, 时间即服务 (time-as-a-service, TaaS) 将成为一种趋势, 时间同步精度典型 SLA 分级见表 3。卫星授时是目前应用最广泛最常见的授时方式, 当前比较成熟的全球卫星导航系统 (global navigation satellite system,



GNSS) 主要包括美国的 GPS (global positioning system)、中国的北斗导航定位系统 (Beidou navigation satellite system, BDS)、俄罗斯的 GLONASS (global navigation satellite system) 和欧盟的 GALILEO (Galileo positioning system), 主流的卫星导航系统授时精度最高可达到数十纳秒级^[33-35]。另一种主流方式是通过网络实现时间同步。网络时间协议方面, 主要包括网络时间协议 (network time protocol, NTP)、精确时间协议 (precision time protocol, PTP)、IEEE 802.1AS 协议 (又称 gPTP, generalized precision time protocol)、白兔 (white rabbit, WR) 等, 常见网络时间协议总结见表 4。当前在为电信网络中基站的正常运转提供时间同步的方案通常采用 GNSS+网

络授时组网方案, 3GPP 定义了一系列架构以实现 5G 系统对时间同步服务的支持^[36], 能实现端到端微秒级的时间同步精度。

(2) 带宽

新兴的高精度应用、未来网络的“泛在连接”对网络的带宽能力提出了超高要求, 而 SLA 分级需求以及确定性网络又对带宽的确定上下限提出了保障需求, 带宽指标典型 SLA 分级见表 5。

5G 增强了峰值数据传输速率、大规模连接能力、移动性能力, 6G 将进一步探索新的频段, 提高信号覆盖范围和数据传输速率, 并通过人工智能和机器学习等手段来优化网络资源分配, 提高带宽利用效率。在保障确定性带宽方面, 灵活以太网 (flexible Ethernet, FlexE) 能通过接口技

表 3 时间同步精度典型 SLA 分级

时间同步精度	典型应用场景
<10 s	电网客户终端设备计量
<1 s	监控与数据采集、批量计量等
<100 ms	变道警告、前向碰撞预警 (forward collision warning, FCW) ^[37] 、协同碰撞预警 (cooperative collision warning, CCW)、紧急电子刹车灯 (electronic emergency brake light, EEBL) ^[38] 等
<10 ms	继电器保护 ^[39]
<1 ms	自动故障记录
<100 μ s	智能分布式馈线自动化 ^[19]
<10 μ s	相量测量 (phasor measurement unit, PMU)
<1 μ s	行波故障定位 ^[40]
<100 ns	可应用于更高要求的场景

表 4 常见网络时间协议总结

协议	授时精度	介绍
NTP	10 ms 左右	由 RFC 1305 定义的基于 UDP 报文进行传输的时间同步协议, 用来在分布式时间服务器和客户端之间进行时间同步
PTP	IEEE 1588-2008 亚微秒级	由电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 2008 年推出, 又称 IEEE 1588v2, 在最大 7 跳的网络环境中, 理论上 PTP 能够保证时钟同步误差在 1 μ s 以内, 在局域网中可以实现亚微秒的时间同步精度 ^[41]
	IEEE 1588-2019 亚纳秒级	2019 年, IEEE 推出的新 1588 标准草案, 又称 IEEE 1588v2.1, 可实现亚纳秒级高精度时间同步 ^[42]
gPTP	纳秒级	由 IEEE 推出的 IEEE 802.1AS 协议, 限制了 PTP 的许多选项并定义了一些特殊性, 可以在局域网内达到纳秒级时间误差
WR	亚纳秒级	2008 年, 欧洲核子研究组织 (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) 启动白兔 (WR) 项目, 以标准千兆以太网为基础, 使用物理层同步以太网 (synchronous Ethernet, SyncE) 技术实现频率同步, 使用 IEEE 1588v2 实现时间同步, 使用全数字双混频器 (digital dual mixer time difference, DDMTD) 将时间戳同步精度提高至亚纳秒 ^[43]

表5 带宽典型SLA分级

带宽/(Mbit·s ⁻¹)	典型应用场景
>1	设备信息采集、环境监测等
>10	控制类设备远程操控、远程自动泊车、移动机器人、远程实时会诊等
>50	无人天车、港机远控、高清视频监控等
>100	AR 远程辅助、机器视觉质量检测等
>500	工厂大规模连接、列车通信网络等

术在物理层和链路层之间插入中间层，提供比传统以太网更加灵活的带宽颗粒度，实现链路捆绑、子速率承载、硬管道及隔离等机制，承载各类速率需求业务；网络切片通过资源隔离，能够按需支撑带宽资源弹性灵活的分配和保障；多接入边缘计算（multi-access edge computing, MEC）可以缩短传输路径，降低传输成本，减少抖动和拥塞的发生概率，从而提升带宽确定性能力^[44]。带宽能力主要取决于使用的频段和底层的信号调制技术，5G的用户体验速率在百兆到千兆之间，而6G技术预期提供千兆以上的用户体验速率、Tbit/s的峰值速率和更智能化的资源分配能力，以满足未来网络的高要求。

（3）时延

大量新兴业务都是时间敏感的，保障恶劣条件下的时延上限成为确定性网络的目标。时延典型SLA分级见表6。

造成时延的原因是多方面的，可以归纳为输出时延、链路时延、处理时延、排队时延等^[45]。其中节点中的排队时延是造成长尾效应的主要因素。网络拥塞发生的时候，报文必须在网络设备中排队等待，这个等待时间不是确定的，网络越繁忙则排队时延越长。而在确定性网络中，可以通过事先调度规划数据包序列，消除等待冲突，使网络的关键数据包传送处于确定的状态，例如TSN中，采用帧抢占和流量整形机制，以实现传输零拥塞丢包的传输，从而提供上限保证的低时延；确定性网络（deterministic network, DetNet）采用排队算法、缓冲区预留和包抢占等机制确保

数据在网络中的确定性传输，降低时延；确定性IP（deterministic IP, DIP）通过精确控制每个数据包在每一跳的传输时机，减少微突发、消除长尾效应，从而最终实现端到端的时延确定性。除此之外，MEC可以通过就近部署的用户平面功能（user plane function, UPF）提供本地增强的连接能力，降低时延。5G的超可靠低时延通信（ultra reliable & low latency communication, URLLC）的关键业务指标为1 ms，6G预计达到亚毫秒级。

表6 时延典型SLA分级

时延/ms	典型应用场景
<1 000	用电信息采集、低压集抄等
<200	视频监控、无人机巡检等
<50	精准负荷控制、车辆类设备远程作业操控、手术示教等
<20	AGV智能控制、智能分布式配电自动化、远程超声等
<10	相量测量、控制到控制通信等
<5	移动机器人、运动控制、输电保护等

（4）时延抖动

时延抖动也是典型确定性QoS之一，是由数据包丢失或次序混乱导致的，出现这种现象的首要原因是网络拥堵，其次是无线连接的稳定性较低，易受干扰。时延抖动的确定性保障主要通过优先级划分、抖动消减、缓冲吸收等机制实现，比如TSN通过一系列协议的门控调度、异步整形等机制提供有界的时延和抖动，DetNet通过全局亚微秒级时钟同步或计算引用程序包的执行时间字段来实现抖动消减等。时延抖动典型SLA分级见表7，时延抖动的目标值一般与时延有关，有时也会用时延的百分比值衡量。



表7 时延抖动典型SLA分级

时延抖动	典型应用场景
10 ms	故障定位、隔离和服务恢复
5 ms	云化安防监控
1 ms	AR辅助工作
100 μ s	电流差动保护
<100 μ s	更高要求的场景

(5) 可靠性

5G的URLLC服务提出了以非常高的可靠性(例如, >99.999%)来交付数据包的目标,以满足赋能垂直行业中精准控制类业务的需求,可靠性SLA分级见表8。

表8 可靠性典型SLA分级

可靠性	典型应用场景
99%	港区异常行为监测等
99.9%	无人智能巡检、低压集抄等
99.99%	协作式变道、过程与资产监控、无人天车、视频监控等
99.999%	智能分布式配电自动化、精准负荷控制等
99.999 9%	远程自动泊车、运动控制等

为实现下限有保障的可靠性,可以使用多路复用、包复帧与消除、冗余备份等技术。在FlexE中,数据冗余管道传输机制保障可靠性。TSN的IEEE 802.1CB协议利用帧复制与消除技术,即发送端发送数据时将数据包复制沿不同路径传输,接收端接收数据时删除复制的数据包实现冗余传输,提升可靠性。DetNet将TSN的思想扩展至3层网络,利用分组复制和消除技术来实现可靠性,除此之外,还采用过滤器与相应策略来检测报文的故障和错误并进行调整。

4 确定性SLA指标间耦合关系

除了考虑这些独立的SLA指标之外,当不同的SLA指标间关联较强,或者出于业务需求,单一指标的衡量不如耦合指标更有价值时,可以考虑指标间的耦合关系。

例如,关于时间的度量,涉及的时间同步精

度与网络时延和时延抖动都是息息相关的,还会影响数据的信息新鲜度(age of information, AoI)等其他维度的指标^[46]。为了定义这类关于时间的度量,可以参考开放无线接入网联盟(O-RAN)^[47]或5G工业和自动化联盟(5G-ACIA)^[48]使用的分类方法,将时间尺度分为3种类别:实时/硬实时;近实时/软实时;非实时。这种分类方式不只考虑单一指标作为网络性能衡量,而是以业务需求为出发点,强调与时间相关的业务体验,更符合行业客户的需求。

另一种情况是时延和带宽的耦合关系。带宽对时延的影响和约束是显然的,增大带宽不仅可以容纳更多数据流,还可以减少排队和处理延迟,使数据包更快传输,从而整体降低网络延迟。对于这类强烈关联的指标,可以关注与二者都相关的耦合指标,典型的有带宽-时延乘积(bandwidth-delay product, BDP)、有效带宽等。其中BDP是指网络带宽和时延的成绩,反映了网络链路上在一次往返内可以无数据丢失传输的最大数据量,是TCP等协议的性能调优中的一个重要的参数。有效带宽则是指考虑时延、丢包率等因素后的实际可用带宽。

类似的还有时延-可靠性的耦合关系。其最典型的应用场景是5G的URLLC业务,要求时延低于1 ms,同时还要求99.999%以上的可靠性。文献^[46]提出了一个时延-可靠性函数Pr,定义如下:

$$F_D(\tau) = \Pr(\Delta t \leq \tau | D) \quad (18)$$

其中, Δt 为时延, τ 是指定的时间阈值, D 是系统的某些条件或状态, $F_D(\tau)$ 表示系统在给定时延要求内的可靠性。这个值越大,表示系统在该时间限制内传输数据的可靠性越高。还有一种耦合指标是时延-可靠性折中程度(latency-reliability trade-off degree, LRTD)。LRTD用于衡量针对不同的时延和可靠性要求之间所做的权衡,是系统设计中的一个关键性能参数。较高的

LRTD意味着系统能够在时延和可靠性之间实现更大的灵活性和权衡,而较低的LRTD则意味着在系统设计中更加强调时延或可靠性,而不太容忍对另一个指标的牺牲。

通过这类对指标间耦合关系的探讨,可以对网络情况做出更综合的度量,更好地了解网络的限制和潜力,从而优化网络资源的利用,提高网络的性能。从SLA指标分级的角度来说,如果将不同等级的单一指标分离考虑,会出现大量可能的组合,如考虑将关联指标一起划分等级,可以降低SLA分级组合的烦琐程度,以此制定出更符合不同行业需求和技术趋势的SLA分级方案。

5 结束语

网络确定性与SLA分级的目标是契合的,都是为了给客户提供质量等级可保障的服务。随着toB业务的百花齐放,以及未来网络的确定化趋势,站在面向客户服务角度,针对SLA分级的研究十分重要。一方面,确定性SLA分级可以用于客户确定性网络规划、确定性网络运维、工业互联网确定性网络测评等,在确定性SLA分级的支撑下,垂直行业可以获得定制化的服务级别承诺,提升行业客户的确定性用户体验,增强行业客户的自主选择权;另一方面,确定性SLA分级有利于突破确定性网络关键技术,建立产业体系,构筑行业生态,引导资金加大对工业互联网确定性网络的投入,促进产业向智能化的趋势长期发展,有助于推动实现数字化的、柔性生产的工业网络新时代。为此,仍有一些后续工作需要完成。

(1) 推动相关标准化工作。

确定性SLA指标分级正在逐步形成共识,SLA指标选取和分级设计正在得到机构和企业的重视和推进,这有利于推进垂直行业确定性专网建设。但是在这方面的统一标准化工作仍然存在空白。为实现确定性SLA保障的专网服务,需要各方达成对SLA的明确共识和统一标准。

(2) 指标间耦合关系研究。

本文对SLA指标间耦合关系进行了初步探讨,为了应对未来日益复杂的确定性网络环境,有必要深入研究这一议题,以便更好地将行业需求和网络保障相结合,进一步为行业客户提供更有效的SLA分级方案。

(3) 未来网络确定性指标选取。

随着网络演进和应用的发展,会提出对确定性SLA指标更多的要求,如安全能力、通信系统的智能化水平等^[49-50]。因此,需要再继续挖掘各行业真正关注的SLA指标需求,进一步明确和细化行业专网各项业务在不同指标维度的服务质量级别,并在此基础上丰富SLA保障手段,逐步实现标准化、智能化的SLA规范。

参考文献:

- [1] 工业和信息化部. 关于印发《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)》的通知[Z]. 2020.
MIIT. Notice on the issuance of the "Industrial Internet Innovation and Development Action Plan (2021-2023)"[Z]. 2020.
- [2] 国务院. 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知[Z]. 2022.
State Council. Notice of the State Council on printing and distributing the "14th Five-Year Plan" for the development of the digital economy[Z]. 2022.
- [3] 3GPP. Summary of Rel-16 work items, V16.2.0: TR, 21.916[S]. 2022.
- [4] 3GPP. Study on enhanced support of industrial Internet of things (IIoT) in the 5G system (5GS), V17.0.0: TR 23.700-20 [S]. 2021.
- [5] 3GPP. Study on 5G timing resiliency and TSC&URLLC enhancement, V18.0.0, TR 23.700-25[S]. 2022.
- [6] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
HUANG T, LIU J, WANG S, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [7] 朱瑾瑜, 段世惠, 张恒升, 等. 时间敏感网络技术在工业互联网领域应用必要性分析[J]. 电信科学, 2020, 36(5): 115-124.
ZHU J Y, DUAN S H, ZHANG H S, et al. Analysis on the application necessity of time-sensitive network technology in the field of industrial interconnection[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(5): 115-124.
- [8] 李卫, 孙雷, 王健全, 等. 面向工业自动化的5G与TSN协同关键技术



- 术[J]. 工程科学学报, 2022, 44(6): 1044-1052.
- LI W, SUN L, WANG J Q, et al. Key technologies to enable 5G and TSN coordination for industrial automation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(6): 1044-1052.
- [9] 中兴通讯, 中国移动研究院有限公司. 面向工业互联网的5G TSN实践与展望白皮书[R]. 2022.
- ZTE, CMRI. 5G TSN practices and perspectives for the industrial internet white paper[R]. 2022.
- [10] 汪硕, 王佳森, 蔡磊, 等. 面向工业制造的确定性网络技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 22-29.
- WANG S, WANG J S, CAI L, et al. Development of deterministic networking techniques for industrial manufacturing[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 22-29.
- [11] 段晓东, 刘鹏, 陆璐, 等. 确定性网络技术综述[J]. 电信科学, 2023, 39(11): 1-12.
- DUAN X D, LIU P, LU L, et al. Review of deterministic networking technology[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(11): 1-12.
- [12] 5G确定性网络产业联盟. 5G确定性网络产业白皮书[R]. 2020.
- 5GDNA. 5G deterministic networking industry white paper[R]. 2020.
- [13] 5G确定性网络产业联盟. 5G确定性网络+工业互联网融合白皮书[R]. 2020.
- 5GDNA. 5G deterministic networks + industrial internet convergence white paper[R]. 2020.
- [14] 5G确定性网络产业联盟. 5G确定性网络架构产业白皮书[R]. 2021.
- 5GDNA. 5G deterministic network architecture industry white paper[R]. 2021.
- [15] 张国新. 5G专网关键技术及定制服务实践[J]. 广东通信技术, 2022, 42(12): 25-29.
- ZHANG G X. Key technologies and customized service practice of 5G private network[J]. Guangdong Communication Technology, 2022, 42(12): 25-29.
- [16] 工业互联网产业联盟. 5G+TSN融合部署场景与技术发展白皮书[R]. 2021.
- AI1. 5G+TSN integration deployment scenarios and technology development white paper[R]. 2021.
- [17] GSMA. Smart grid 5G network slicing[R]. 2020.
- [18] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 国家互联网信息办公室, 等. 关于印发《能源领域5G应用实施方案》的通知[R]. 2021.
- NDRC, NEA, CIIIO, et al. Circular on the issuance of the implementation plan for 5G application in the energy sector[R]. 2021.
- [19] 中国移动, 华为, 宝钢, 等. 5G智慧钢铁白皮书[R]. 2020.
- China Mobile, HUAWEI, BAOSTEEL, et al. 5G smart steel white paper[R]. 2020.
- [20] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains, V18.3.0, TS 22.104[S]. 2021.
- [21] 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. 5G deterministic bearer network SLA metrics system white paper[R]. 2021.
- [22] 中国信息通信研究院. 5G端到端切片SLA行业需求研究[R]. 2020.
- CAICT. Research on industry requirements for 5G end-to-end slicing SLA[R]. 2020.
- [23] IETF. RFC 8578: deterministic networking use case[R]. 2019.
- [24] TM Forum. GB917 SLA management handbook release 3.1[R]. 2012.
- [25] TM Forum. GB917 SLA management handbook, volume 2: concepts and principles release 2.5[R]. 2005.
- [26] GSMA. Official document NG. 116: generic network slice template version 2.0[R]. 2019.
- [27] 3GPP. 5G end to end key performance indicators (KPI), V18.3.1: TS 28.554[S]. 2023.
- [28] IEC. IEC 61907:2009 communication network dependability engineering[S]. 2009.
- [29] 3GPP. Service requirements for the 5G system, V19.3.0: TS 22.26[S]. 2023.
- [30] ITU-T. Definitions and terminology for synchronization networks: G.810[S]. 1997.
- [31] 周俊, 赵墨颖, 刘克清, 等. 面向5G专网的SLA保障与实现[C]//2022年5G网络创新研讨会. 2022: 25-30.
- ZHOU J, ZHAO M Y, LIU K Q, et al. SLA guarantee and implementation for 5G private networks[C]//Proceedings of the 5G Network Innovation Seminar (2022). 2022: 25-30.
- [32] 中兴通讯. IP网络未来演进技术白皮书 3.0-增强确定性网络[R]. 2023.
- ZTE. Future evolution of IP networks technical white paper 3.0 - enhanced deterministic networks[R]. 2023.
- [33] 赵飞龙, 王丽莉. 5G多站定位精度分析与提升方法[J]. 物联网学报, 2023, 7(3): 95-102.
- ZHAO F L, WANG L L. Multi-station positioning accuracy and enhancement method for 5G[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(3): 95-102.
- [34] 宿晨庚, 郭树人, 刘旭楠, 等. 北斗三号基本系统空间信号质量评估[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(11): 2689-2697.
- SU C G, GUO S R, LIU X N, et al. Signal quality assessment of BDS-3 preliminary system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(11): 2689-2697.
- [35] 吴海涛, 李孝辉, 卢晓春, 等. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- WU H T, LI X H, LU X C, et al. Time base for satellite navigation systems[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [36] 3GPP. System architecture for the 5G System (5GS), V17.8.0, TS 23.501[S]. 2023.
- [37] RASHEED A, GIHHANI S, AJMAL S, et al. Vehicular ad hoc network (VANET): a survey, challenges and applications[C]//

- Proceedings of VANET Second International Workshop. Singapore: Springer, 2017: 39-51.
- [38] HASAN K F, WANG C, FENG Y, et al. Time synchronization in vehicular ad-hoc networks: a survey on theory and practice[J]. Vehicular Communications, 2018, 14: 39 - 51.
- [39] European GNSS Service Centre. Report on time and synchronisation user needs and requirements[R]. 2021.
- [40] NIST. An evaluation of dependencies of critical infrastructure timing systems on the global positioning system (GPS)[R]. 2021.
- [41] IEEE Standards Association. IEEE Std 1588-2008, IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S]. 2008.
- [42] IEEE Standards Association. IEEE Std 1588-2019, IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S]. 2020.
- [43] LIPINSKI M, WLOSTOWSKI T, SERRANO J, et al. White rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Munich: IEEE Press, 2011: 25-30.
- [44] 网络通信与安全紫金山实验室. 未来网络白皮书[R]. 2021. PML. Future networks white paper[R]. 2021.
- [45] 华为. 时间敏感和确定性网络白皮书[R]. 2017. HUAWEI. Time-sensitive and deterministic networking white-paper[R]. 2017.
- [46] POPOVSKI P, CHIARIOTTI F, HUANG K B, et al. A perspective on time toward wireless 6G[C]// Proceedings of the IEEE, 2022, 110(8): 1116-1146.
- [47] O-RAN Alliance. O-RAN: towards an open and smart RAN[R]. 2018.
- [48] 5G-ACIA. Key 5G use cases and requirements[R]. 2019.
- [49] 裴郁杉, 王友祥, 黄蓉, 等. 5G/5G-A 确定性技术体系赋能工业互联网[J]. 邮电设计技术, 2023(5): 25-32. PEI Y S, WANG Y X, HUANG R, et al. 5G/5G-A deterministic technologies empowering industrial internet[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(5): 25-32.
- [50] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.

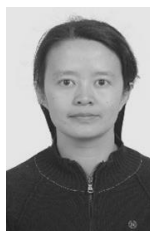
[作者简介]



张沐风 (2000-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络、网络时间同步。



李洪星 (1990-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室在站博士后, 主要研究方向为时间同步、时间敏感网络和边缘计算。



王柯 (1973-), 女, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为通信网络和产业发展研究、卫星互联网、北斗、国际通信、应急通信、行业专网通信。



李晓良 (1979-), 女, 博士, 现就职于中国移动通信集团设计院有限公司, 主要研究方向为通信系统研发与集成。



刘雅琼 (1988-), 女, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授, 主要研究方向为边缘计算、车联网和边缘智能。



胡怡红 (1961-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授, 主要研究方向为光纤与无线网络技术、网络监控与管理、软件定义网络架构与技术。



寿国础 (1965-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为接入网络与边缘计算、光纤与无线网络虚拟化、网络构建与路由、移动互联网与应用。