

# 5G TSN-IP 确定性时延保障方案 设计及创新应用验证

## 5G TSN-IP Deterministic Delay Guarantee Scheme Design and Innovative Application Verification

邢剑卿,王笃炎,刘惜吾,陈华旺(中国联通广东分公司,广东 广州 510627)

Xing Jianqing, Wang Duyan, Liu Xiwu, Chen Huawang (China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou 510627, China)

### 摘要:

当前 5G 网络在工业、电力、港口等行业的业务场景和业务类型呈爆炸式增长,不同行业的业务需求差异化显著,而且要求严格的网络性能指标保障。但是传统网络无法区分这些业务之间的优先级高低,导致 IP 网络的端到端 SLA 无法得到明确保障。因此,5G TSN-IP 确定性技术在 R16 中应运而生。首先分析传统 IP QoS 面临的挑战,介绍 5G TSN-IP 实现原理,探讨 5G TSN-IP 落地方案设计,最后基于典型应用场景中的不同业务需求设计测试方案,并进行测试验证,证明了 5G TSN-IP 的网络确定性保障能力。

### Abstract:

At present, the business scenarios and types of 5G networks in industries such as industry, power and ports are growing explosively. The business requirements of different industries are highly differentiated, and strict network performance index commitments are required. However, traditional network cannot distinguish the priority level between these services, resulting in the E2E SLA of IP networks cannot be guaranteed with certainty. Therefore, 5G TSN-IP deterministic technology comes into being in R16. It firstly analyzes the challenges faced by the traditional IP network QoS, and introduces the principle of 5G TSN-IP implementation, discusses the design of 5G TSN-IP landing scheme, and finally designs test schemes based on different service requirements in typical application scenarios, and conducts test verification to prove the network deterministic guarantee capability of 5G TSN-IP.

### Keywords:

5G; TSN-IP; Deterministic delay guarantee; Industrial Internet

**引用格式:**邢剑卿,王笃炎,刘惜吾,等. 5G TSN-IP 确定性时延保障方案设计及创新应用验证[J]. 邮电设计技术, 2022(10): 59-64.

## 0 引言

传统的 IP 网络 QoS 方式,面向终端用户有限的业务类型时(如语音、视频、上网等),通过为不同的业务分配不同的优先级来尽力提升服务质量,但不做任何量化 SLA 承诺。现网中大部分业务基于最短路径转发,设备转发面并不量化预留资源,在部分业务突发较大,或者上下游加速转发(Expedited Forwarding, EF)带宽不匹配,或者多个流汇聚等情况下,可能产生

### 关键词:

5G; TSN-IP; 确定性保障; 工业互联网

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.10.012

文章编号: 1007-3043(2022)10-0059-06

中图分类号: TN915

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



网络的拥塞/瞬时拥塞,影响业务的带宽、时延、丢包率等指标。当前网络的应对方式是让承载网络尽量轻载,降低拥塞/瞬时拥塞的可能性,但会产生大量的带宽浪费,却依然不能提供 100% 网络能力保障。

在工业互联网场景下,5G TSN-IP 可以面向各类工业应用涉及的业务流特性进行建模和定义<sup>[1]</sup>,并在此基础上,自适应定义不同的优先级与调度机制,从而实现 5G 网络服务质量差异化保障。

## 1 传统 QoS 面临的挑战

传统 IP 网络是面向无连接的统计复用网络<sup>[2]</sup>。如

收稿日期: 2022-08-28

图1所示,来自不同入接口的报文,汇聚后从同一个出接口发出,出接口报文输出顺序是根据报文到达出接口队列的时机决定,先到的先发出,后到的后发出。

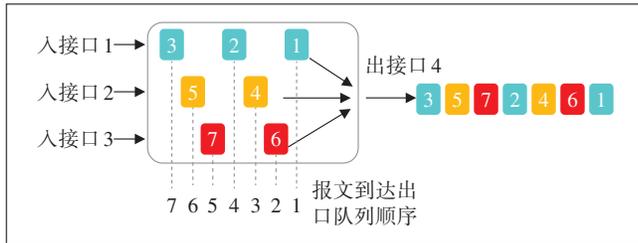


图1 传统IP网络转发机制

传统IP网络是尽力而为网络。其优势在于:充分利用网络带宽,节省运营商的网络投资<sup>[3]</sup>。但随着5G网络技术日新月异的演进和工业互联网复杂多样的严苛业务需求,传统IP网络面临以下挑战:

a) 优先处理,但不承诺:从RFC3246对于EF的定义可以看出<sup>[4]</sup>,EF优先级是单节点优先处理的行为,但不能对业务SLA做出承诺。

b) 缺少全局规划和资源预留:DiffServ定义的逐跳行为(Per-Hop Behavior, PHB)是一个单机行为,缺少全局视角且不能预留充足的资源,难以做到业务端到端SLA保障。

c) 无差异化能力:所有关键业务都是EF转发,1ms业务和20ms业务等同处理<sup>[5]</sup>。

d) 网络轻载难以定义:突发业务引起的峰值速率比例大,可能引起瞬时拥塞<sup>[6]</sup>;此外,在保障SLA基础上,可以部署业务的数量难以量化<sup>[7]</sup>。

因此,亟需引入5G TSN-IP技术突破当前瓶颈,满足工业互联网网络需求。

## 2 TSN-IP 方案设计

### 2.1 TSN-IP 理论基础

面向5G网络确定性时延关键挑战,TSN-IP方案基于对网络演算理论的工程化探索,以创新的控制面时延编排算法和转发面时延队列调度设计,达成高价值业务端到端时延保障、低价值业务带宽充分复用、关键业务队列级隔离以及现网设备平滑演进的目标<sup>[8]</sup>。

如图2所示,TSN-IP的实现原理是在原有的网络控制器基础上,配置了一个专用的大脑,通过设备转发面的触手,在业务入口自动学习业务的流量模型,评估收集各种业务的平均速率、峰值速率、突发大小

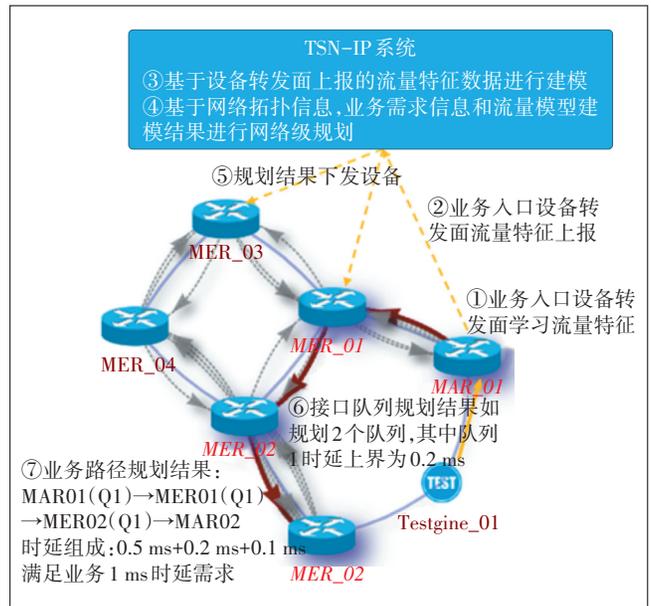


图2 TSN-IP实现原理示意图

等参数,基于网络演算理论在全局量化计算,在网络节点接口处规划高优先级车道,量化预留资源,并给出各种业务的最优转发路径,最终给出节点级和网络级的时延上界承诺。

在设备级,TSN-IP将网络演算理论应用于设备端口队列,基于现有QoS队列调度能力,叠加业务流量模型和设备调度服务模型,规划时延队列做到节点级时延保障。在网络级,依靠全局规划算法规划队列级业务路径,并量化计算资源预留,保障业务端到端时延可靠。TSN-IP演算理论框架如图3所示。

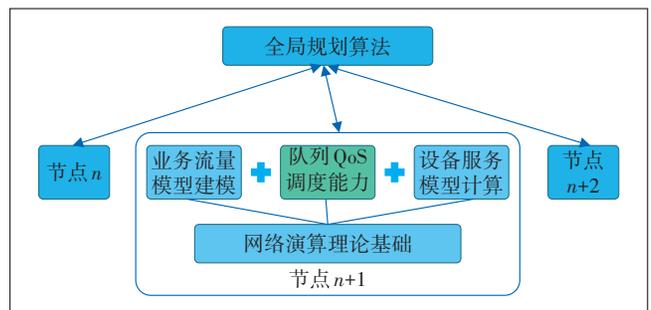


图3 TSN-IP演算理论框架图

根据网络演算理论基础,建立业务流量模型、设备服务模型和时延上限之间的算法关系。通过基于业务时延上限需求和业务流量模型,求解设备服务模型。网络演算理论基本原理如图4所示。

### 2.2 设备级方案设计

#### 2.2.1 业务到达模型建模方法

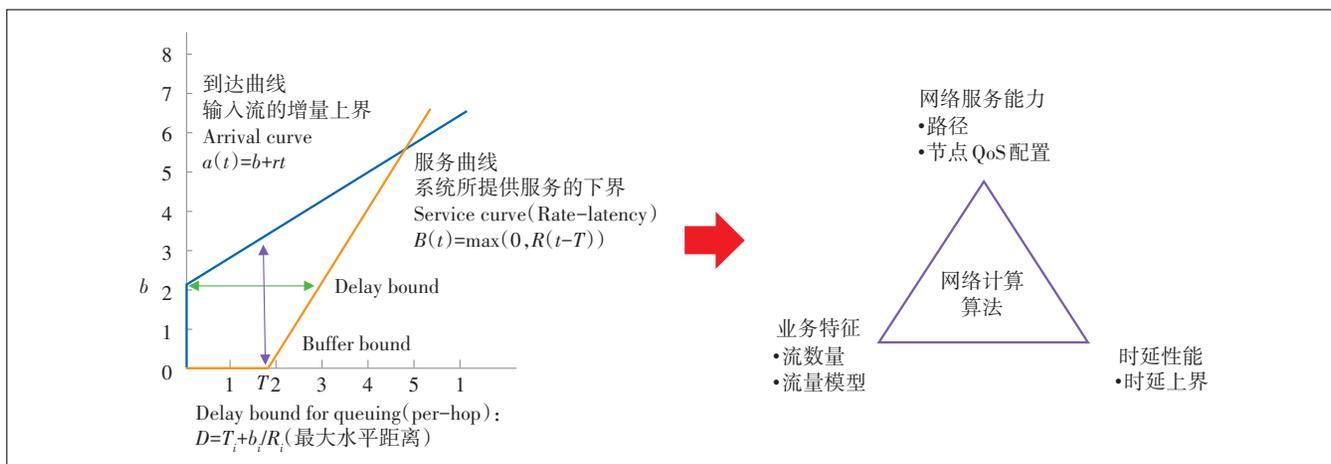


图4 网络演算理论基本原理

基于设备转发面采集上报的实时测量信息,如报文到达时间、报文长度等信息,上报控制面分析模块。

分析模块拟合流量模型(到达曲线),保证任意时间段均为实际累计流量的上包络。

转发面和分析模块间使用压缩算法,减小上报数据量,提升信息上报效率。流量特征提取基本原理如图5所示。

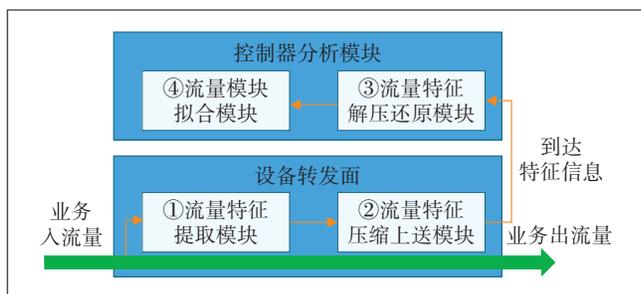


图5 流量特征提取基本原理

### 2.2.2 服务模型保障方案

选取用户队列为时延队列的规划对象,不同时延队列之间,使用差分加权轮循(Deficit Weighted Round Robin, DWRR)按照权重调度,基于算法规划结果,为不同的时延队列配置资源预留值/调度权重。

在顶层端口队列使用严格优先级(Strict Priority, SP)调度,优先调度时延队列(时延敏感业务),然后调度其他队列(非时延敏感业务)。

### 2.3 网络级方案设计

基于设备队列级时延保障能力,配合管控面的路径、队列、资源规划算法,规划设备队列数量、队列时延等级、队列预留资源、业务队列级路径等,从而保证业务网络级时延上限。

## 3 TSN-IP 典型应用场景测试验证

### 3.1 测试方案及环境搭建

基于流量特征分析器、TSN-IP规划工具和流量特征提取设备构建TSN-IP管控系统,与ATN1(Advanced Transport Network)相连,接入测试网络。TSN-IP管控系统完成流量特征提取,将流量特征提取结果通知TSN-IP规划工具。TSN-IP规划工具基于流量特征数据、网络拓扑信息、业务需求信息等,算法计算设备相关端口时延队列预留资源,以及队列级的规划路径。最后,规划结果通过Telnet/SSH(Secure Shell)下发给ATN/MER(X8A/X16A)设备。5G TSN-IP测试方案拓扑图如图6所示。

其中ATN1-MER1、MER1-MER2、MER2-ATN2、ATN1-ATN2间链路为50GE链路,MER1-MER3、MER3-MER4间为GE链路,MER4-MER2间为10GE链路,从而模拟了网络中多种带宽链路网络场景下的规划部署能力。

ATN1和ATN2分别提供4个GE接口与12×GE测试仪相连,用于接入测试仪业务模拟流量,4个GE接口与8×10GE测试仪相连,用于接入测试仪模拟的背景流量。

另外,在实验网机房部署2台测试仪,分别用于构建业务模拟流量和背景业务流量。ATN1模拟业务云端或者服务端,ATN2模拟客户侧终端,构建上下双向业务,验证部署TSN-IP确定性方案后,三大场景业务时延保障能力。

### 3.2 应用场景测试用例

本次测试选取智能电网、智慧港口和工厂自动化

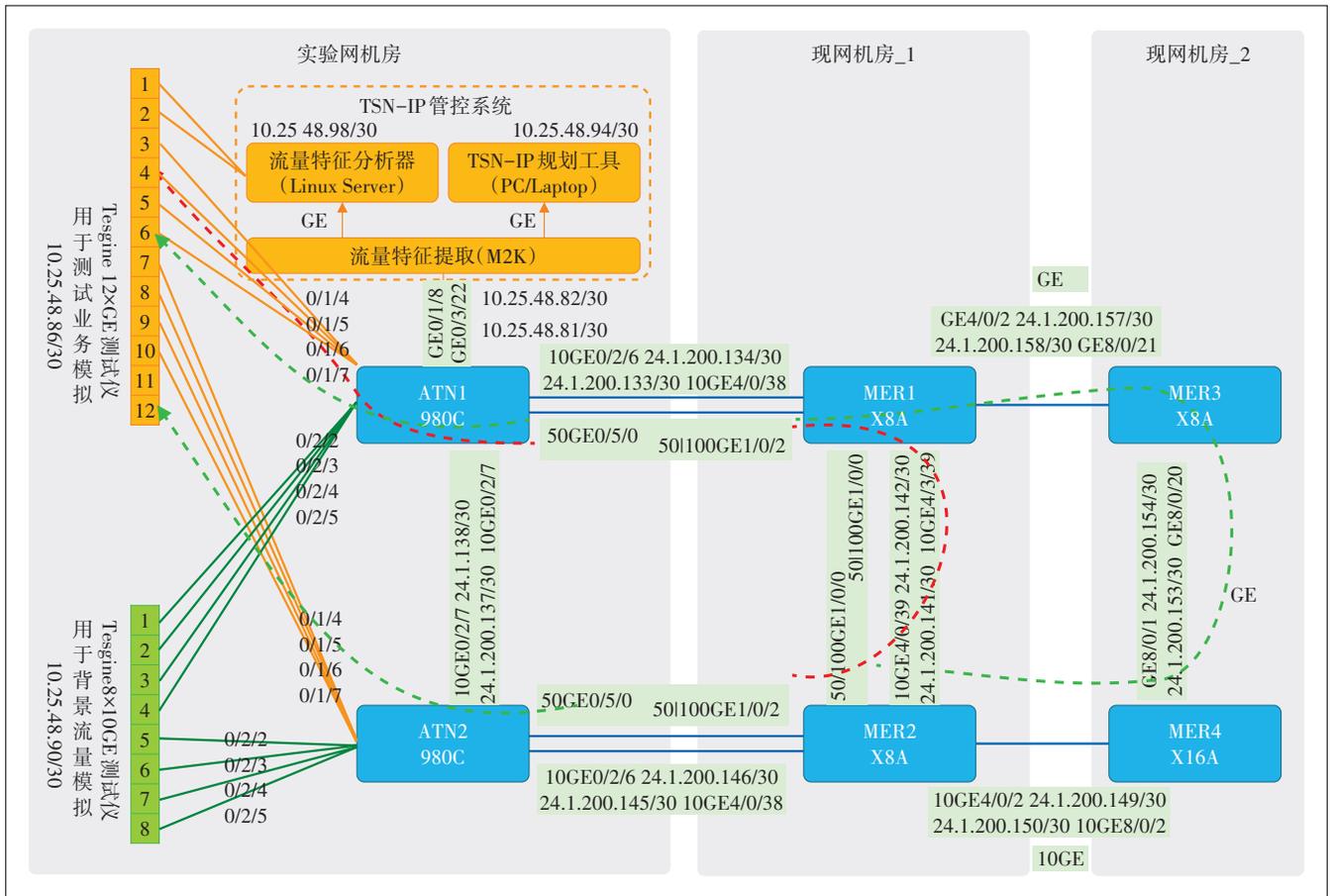


图6 5G TSN-IP测试方案拓扑图

三大业务场景,分别对电力差动保护、龙门吊控制业务、龙门吊视频业务、AGV集卡控制业务、工厂自动控制业务等共15种业务进行测试,相关业务流量模型和网络需求参考3GPP TS 122.104<sup>[9]</sup>。

### 3.3 典型测试用例验证结果

本次测试共涉及3类典型场景、15种业务、30个测试用例,本文选取3种典型业务场景测试用例中的电力差动保护、龙门吊控制业务、工厂自动控制业务进行重点分析。其中,对电力差动保护、龙门吊控制业务进行流量特征采集测试,对工厂自动控制业务进行业务确定性保障测试。

#### 3.3.1 电力差动保护业务

电力差动保护是典型的低时延、高可靠需求业务之一<sup>[10]</sup>,具体性能要求如表1所示。

表1 电力差动保护典型业务需求

通信服务可用性/%	端到端时延/ms	承载网分解时延/ms	计划模拟终端数量	传输间隔/us
99.999	12	≤3	10	833

根据表1中的需求,采用测试仪模拟业务流配置如表2所示。

表2 电力差动保护业务测试仪配置

包长/B	突发速率	每突发报文数/个	突发间隔/μs
256	1 Gbit/s 线速突发	10	833

图7为分析器从设备转发面获取业务特征数据,并可视化呈现ms级报文到达Bytes数。

建模拟合结果如图8所示,呈现结果与测试仪构造特征匹配,并输出TSN-IP规划工具所需的报文大小、峰值速率、平均速率、突发大小等建模结果,建模结果能够包络目标业务流量到达曲线。

#### 3.3.2 龙门吊控制信号业务

龙门吊控制也是典型的低时延、高可靠需求业务之一<sup>[11]</sup>,具体性能要求如表3所示。

根据表3中的需求,采用测试仪模拟业务流配置如表4所示。

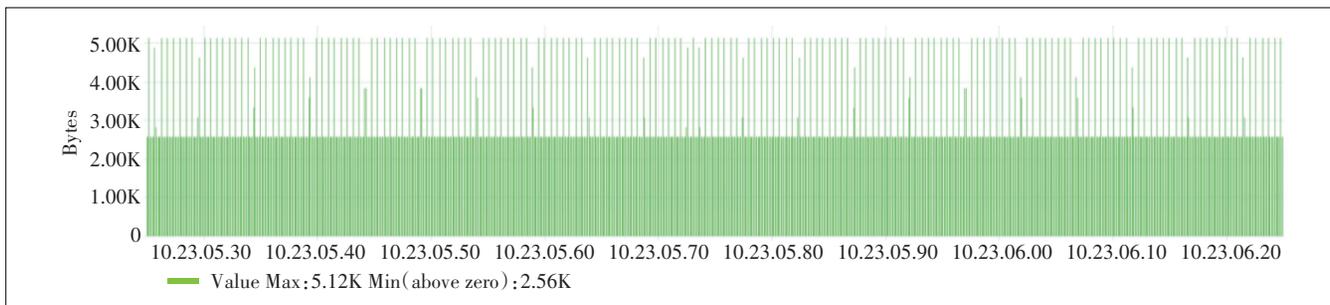


图7 业务达到模型监控

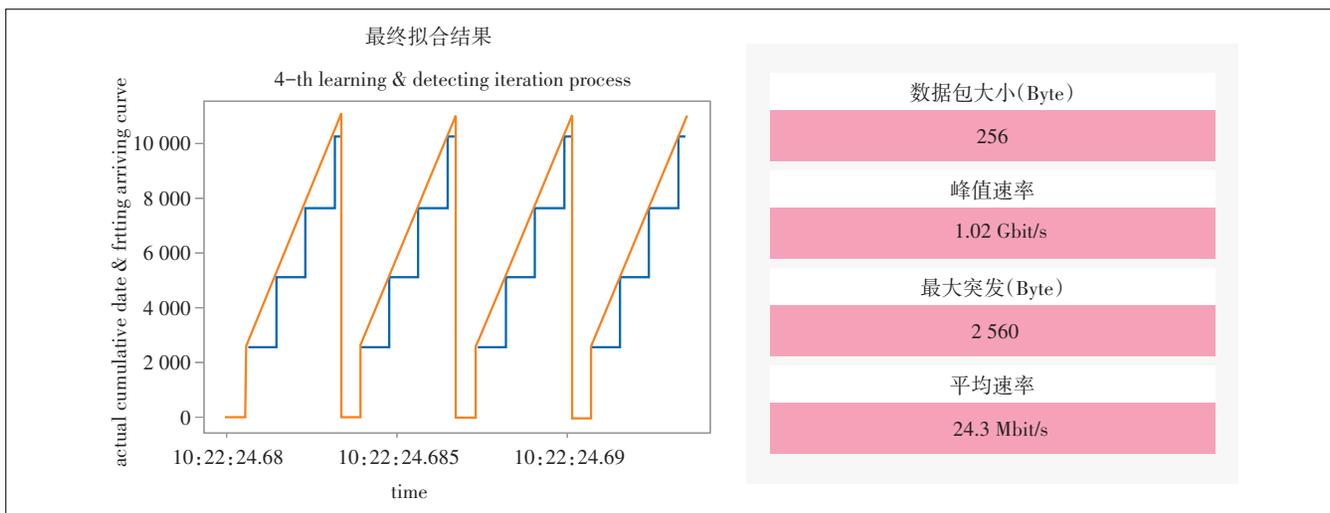


图8 建模拟合结果

表3 龙门吊控制信号典型业务需求

通信服务可用性/%	端到端时延/ms	承载网分解时延/ms	计划模拟终端数量	传输间隔/ms
99.999	10	≤2.5	10	6

表4 龙门吊控制信号业务测试仪配置

包长/B	突发速率	每突发报文数/个	突发间隔/ms
256	1 Gbit/s 线速突发	10	6

图9为分析器从设备转发面获取业务特征数据,并可视化呈现ms级报文到达Bytes数。

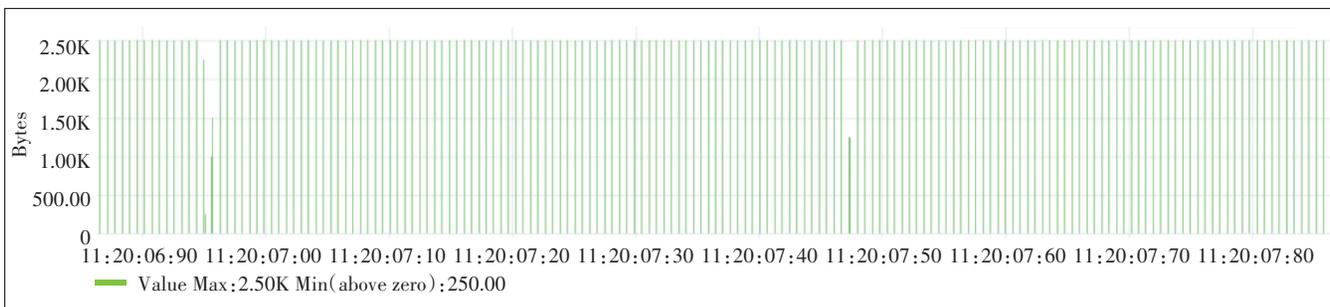


图9 业务达到模型监控

建模拟合结果如图10所示。呈现结果与测试仪构造特征匹配,并输出TSN-IP规划工具所需的报文大小、峰值速率、平均速率、突发大小等建模结果,建模结果能够包络目标业务流量到达曲线。

### 3.3.3 工厂自动化运动控制业务

工厂自动化运动控制是典型的超低时延、超高可靠需求业务<sup>[12]</sup>,具体性能要求如表5所示。

经过控制面规划和配置下发,业务最大时延始终低于需求时延和规划时延。资源预留数据量化呈现,业务队列级路径清晰呈现。

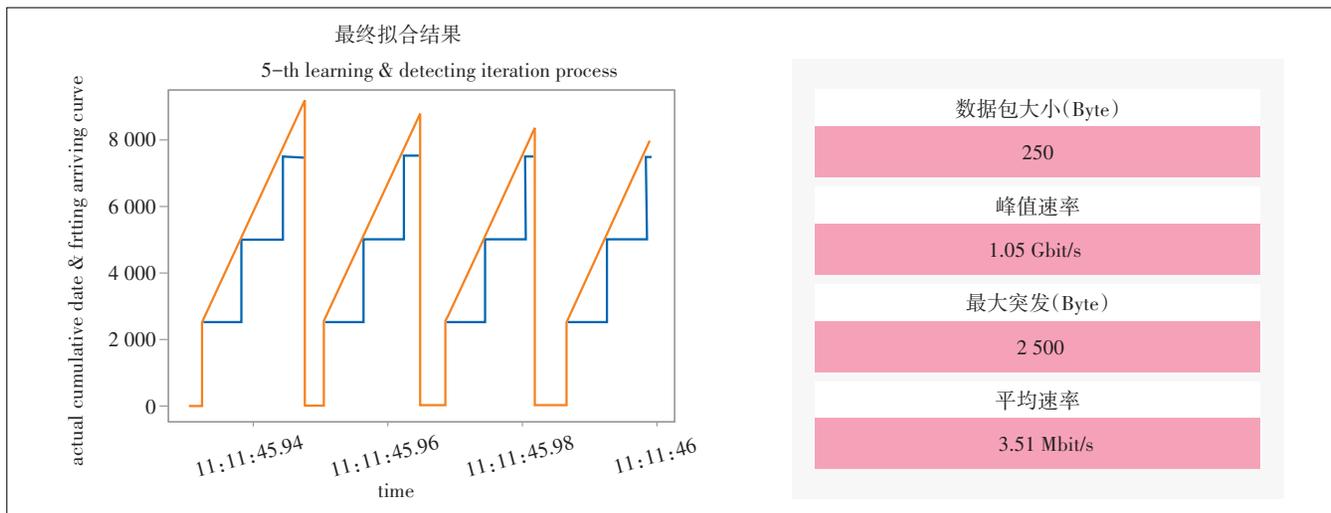


图 10 建模拟合结果

表 5 工厂自动化运动控制典型业务需求

通信服务可用性/%	端到端时延/ms	承载网分解时延/ms	计划模拟终端数量	传输间隔/ms
99.9999	1	≤0.5	10	1

业务间呈现差异化保障效果,并且在背景流量冲击下,时延保障效果仍然保持良好。

## 4 总结

实验结果表明,5G TSN-IP 确定性网络技术方案可实现对业务流量特征自动学习,在不依赖网络低载的条件下,TSN-IP 技术能针对可识别的数据流进行有效的时延和带宽上界保障;可解决为了保障服务质量网络被迫空载/低载的问题,可满足不同业务对网络性能的差异化需求,提供精细化的网络服务保障。该技术与算网大脑等技术结合,可在更大范围内实现网络规划与优化策略的协调,以达到提高运营商全网资源利用率的效果。

TSN-IP 等确定性网络技术与 5G 的结合,不仅可以赋能工业企业提供性能稳定的定制化网络服务,也能为游戏、XR 等实时交互类业务提供保障,是运营商未来面向垂直行业多样化需求的关键网络技术。

### 参考文献:

[1] 张强,王卫斌,陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 21-26.  
[2] 徐樑,蔡宾. 基于 5G+时间敏感网络的工业互联网应用探讨[J]. 广西通信技术, 2021(3): 1-5.  
[3] 樊陆陆,郭刚. 基于工业互联网的 5G TSN 研究[J]. 通信技术,

2021, 54(4): 893-897.

[4] 韩文璇,朱海龙,何欣欣,等. 一种结合入队整形的 TSN 流量调度算法[J/OL]. [2022-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.tp.20220817.1649.004.html>.  
[5] 李立平,陆威,王梦晓,等. 5G 专网 TSN 总体架构及关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46(8): 41-46, 105.  
[6] 李晓辉,王先文,樊韬,等. 5G-TSN 系统下的高精度时间同步[J/OL]. [2022-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.tn.20220609.1824.012.html>.  
[7] 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.  
[8] 伍丽娇. 面向工业低延迟高可靠应用的 5G 资源调度研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2021.  
[9] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains: 3GPP TS 22[S/OL]. [2022-06-30]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.  
[10] 贾惠彬,胡子函,吴堃,等. 基于时间敏感网络的变电站通信网络最大时延计算方法[J/OL]. [2022-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221009.1114.002.html>.  
[11] 李晓良,聂嘉盈,刘文婷. 面向工业互联网的 5G TSN 融合组网与配置增强技术[C]//5G 网络创新研讨会(2022)论文集. 北京:中国电子科技集团公司第 7 研究所, 2022: 78-82.  
[12] 刘玮,乔晶,张宏坤,等. 5G+确定性网络技术实现与演进[C]//5G 网络创新研讨会(2022)论文集. 北京:中国电子科技集团公司第 7 研究所, 2022: 31-36.

### 作者简介:

邢剑卿,高级工程师,硕士,主要从事 5G 网络能力创新研究工作;王笃炎,高级工程师,硕士,主要从事 5G 网络能力创新研究工作;刘惜吾,高级工程师,硕士,主要从事 5G 网络能力创新研究工作;陈华旺,工程师,本科,主要从事 5G 网络能力创新研究工作。