

基于网络演算的 LEO 卫星网络时延上界分析研究

王慧姊^{1,2}, 孙雷^{1,2}, 王健全^{1,2}, 林尚静³, 王卓群^{1,2}, SUN Kewen⁴

(1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学工业互联网研究院, 北京 100083;
3. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 4. 英国布拉德福德大学工程与数字技术学院, 布拉德福德 BD7 1DP)

摘要: 在空天地一体化网络中, 准确地刻画业务时延上界对实现可靠性传输至关重要。基于确定性网络演算理论和时间敏感网络 (TSN) 中的时间感知整形 (TAS) 机制, 构建了一种适用于 LEO 卫星的时延上界分析模型。首先, 在空天地一体化网络背景下, 构建了基于网络演算的 LEO 卫星网络时延保障架构; 然后, 基于漏桶模型构建了业务模型, 并考虑了不同优先级干扰流在最坏情况下的影响, 构建了单卫星节点服务曲线。针对同优先级干扰流, 提出了一种新的剩余服务曲线计算方法, 并结合最小加代数的卷积定理构建了改进的网络演算算法。最后, 在给定 LEO 卫星网络和业务模型下对所提算法进行了测试, 并将其和 3 种传统的代数类网络演算算法进行了对比分析。实验结果表明, 所提算法能更准确地评估端到端时延上界, 且计算时间显著降低。

关键词: 空天地一体化网络; 时间敏感网络; 确定性网络演算; 时延上界分析

中图分类号: TN91

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025074

Research on delay upper bound analysis based on network calculus for LEO satellite network

WANG Huizi^{1,2}, SUN Lei^{1,2}, WANG Jianquan^{1,2}, LIN Shangjing³, WANG Zhuoqun^{1,2}, SUN Kewen⁴

1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Institute of Industrial Internet, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
4. Faculty of Engineering & Digital Technologies, University of Bradford, Bradford BD7 1DP, UK

Abstract: It's essential to achieve reliable transmission by accurately characterizing the delay upper bound in space-air-ground integrated network (SAGIN). Based on deterministic network calculus and time-aware shaping (TAS) mechanism in time-sensitive networking (TSN), a delay upper bound analysis model for low earth orbit (LEO) satellites was constructed. Firstly, a delay upper bound guarantee architecture for LEO satellite network (DGA-LEO) was developed using network calculus within the context of SAGIN. Next, a traffic model was formulated based on leaky bucket model, considering the worst-case impact of interference from different priorities, and then the service curve for a satellite node was established. For the same-priority interference, a new left-over service curve calculation method was proposed, and based on the convolution theory in min-plus algebra, an improved network calculus algorithm was developed. Finally, the proposed algorithm was tested under a defined LEO satellite network and traffic model, and the comparative analysis was conducted with three traditional algebraic network calculus algorithms. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm achieves more accurate delay upper bounds while significantly reducing computation time.

Keywords: space-air-ground integrated network, time-sensitive networking, deterministic network calculus, delay upper bound analysis

收稿日期: 2025-02-12; 修回日期: 2025-04-07

通信作者: 孙雷, sun_lei@ustb.edu.cn

基金项目: 北京市自然科学基金海淀原始创新联合基金资助项目(No.L232001)

Foundation Item: The Joint Research Fund for Beijing Natural Science Foundation and Haidian Original Innovation (No.L232001)

0 引言

当前,我国超过80%的陆地区域和95%的海洋区域缺乏地面移动通信网络^[1],这无法满足下一代6G宽带无线通信网络所提出的“泛在连接、多网融合”的愿景^[2-3]。为支持未来通信网络随时随地和无所不在的用户服务,构建空天地一体化网络(SAGIN, space-air-ground integrated network)成为未来6G的核心发展方向。

如图1所示,SAGIN以地基网络为基础,以空基网络和天基网络为扩展,集成地面与非地面网络实现广域覆盖和深度融合。然而,在面向提供确定性服务的全域高动态网络环境中,SAGIN面临传输时延高、网络中的用户数据急剧增加、难以保障服务质量(QoS, quality of service)等挑战^[4]。其中,数据传输的实时性是确保SAGIN高效稳定、满足业务传输的QoS要求和实现可靠的端到端服务的重要因素,人们对卫星传输的实时性提出了更高的要求^[5]。卫星互联网通过星间组网实现互联互通。然而,由于卫星网络拓扑的时变性以及多样化的传输业务,带宽资源竞争加剧,星间链路拥塞概率增加,从而可能导致业务无法在时延界限内完成

传输,影响其满足高可靠和确定性的传输需求。

低地球轨道(LEO, low earth orbit)卫星通信系统由LEO卫星星座、地面控制中心、地面骨干网等组成,是空天地研究领域的热点。LEO卫星具有更小的尺寸和发射成本,与高地球轨道(GEO, geostationary earth orbit)卫星和中地球轨道(MEO, medium earth orbit)卫星相比,能达到更高的吞吐量和更低的传播时延^[6]。此外,LEO卫星轨道高度低、抗干扰能力强、能够实现快速变换等优势使其更容易满足地面通信业务的时延需求,有望为地面更多用户类型提供更高质量的通信服务。

传统以太网因缺少确定性传输机制,难以满足确定性低时延业务的传输需求。在此背景下,IEEE 802.1 音视频桥接(AVB, audio and video bridging)工作组升级为时间敏感网络(TSN, time-sensitive networking)工作组^[7-8],提出的时间同步、流量调度等增强协议^[9]支持标准以太网的确定性传输。TSN被视为具有潜力的新一代通信网络,通过严格的时序控制和流量调度,为克服LEO卫星网络在数据传输上的时延上界不确定性提供可能。

然而,TSN作为一种有线传输技术,直接被引

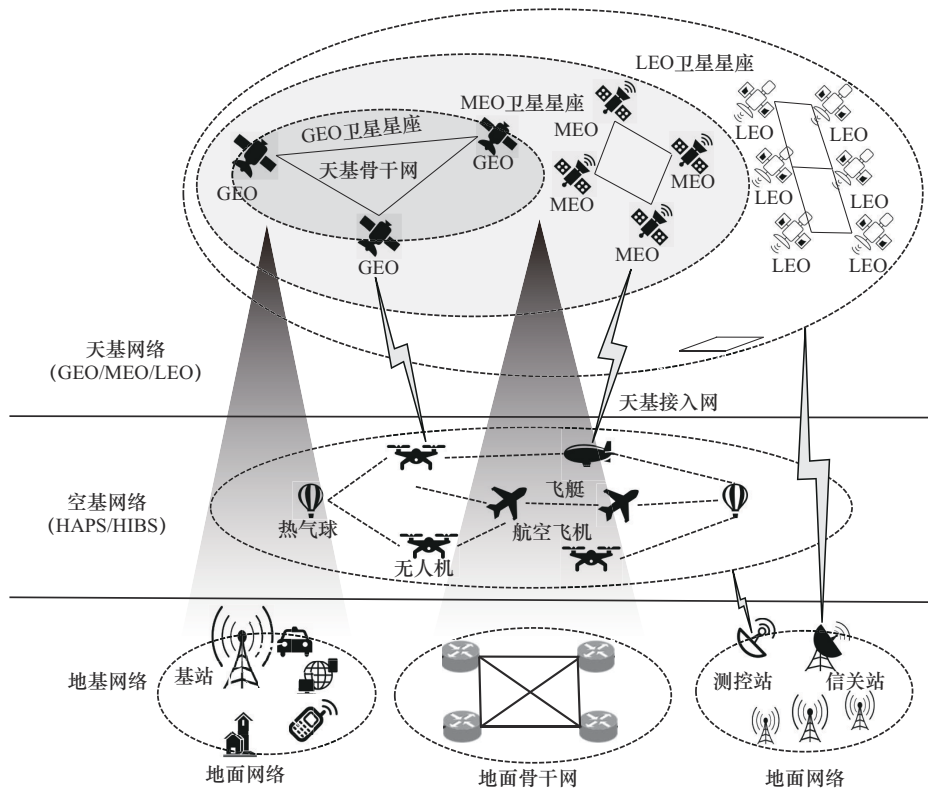


图1 SAGIN整体架构

入卫星网络是不现实的,因此,本文考虑仅将TSN的确定性调度机制引入LEO卫星通信系统,同时结合卫星通信的特点,推动高可靠、高质量的服务在复杂动态的卫星网络环境中的应用。

网络演算(NC, network calculus)^[10]作为一种新兴的数学工具,其优势在于能够以直观、准确的方式描述业务的端到端性能。对于LEO业务传输的实时性而言,利用网络演算评估流量时延上界的分析过程可以和TSN调度机制结合,协助对门控列表(GCL, gate control list)进行合理配置及网络资源预留。当前,针对空天地一体化组网结合TSN机制的时延保障机制研究较少。因此,本文以LEO卫星网络通信系统为研究背景,结合TSN中的时间感知整形(TAS, time awareness shaping)调度机制,采用不同的代数类网络演算算法对卫星网络的时延上界进行建模和分析,主要工作如下。

1) 构建了一种基于网络演算的LEO卫星网络时延保障架构(DGA-LEO, delay upper bound guarantee architecture for LEO network),将TAS机制融入卫星节点,并将基于网络演算的LEO卫星网络时延分析模型嵌入GEO卫星控制器,为数据面接入LEO卫星网络各类业务分析时延上界。

2) 针对融合了TAS的LEO卫星节点,考虑节点出端口不同队列上和同一队列内业务间的相互干扰,提出了一种新的剩余服务曲线计算方法,并结合卷积定理构建了一种改进的网络演算算法。

3) 将提出的改进网络演算算法与3种经典的传统代数类网络演算算法进行对比分析,所提算法能更准确地评估给定业务流的端到端时延上界,并具有最低的计算复杂度和最短的计算时间。

1 研究现状与问题分析

网络演算因其在评估网络流量时延范围方面形成的成熟理论框架而著称。代数类确定性网络演算(algDNC, algebraic deterministic network calculus)算法采用基于运算器的方法计算时延上界,包括TFA(total flow analysis)、SFA(separated flow analysis)和PMOO(pay multiplexing only once)算法等^[10-11]。为了深入了解人工系统,文献[10]为设计和分析确定性排队系统引入了大量网络演算理论。基于文献[10],文献[11]更简洁地引入了DNC的数学背景,包括不同的algDNC运算器和算法。文

献[12]介绍了一种新的针对大规模前馈网络的DNC算法,集成SFA与PMOO,显著提高了准确度和计算效率。文献[13]首次证明PBOO(pay burst only once)可以应用于实时演算(RTC, real-time calculus),并证明了PBOO有利于计算网络系统的时延边界。

基于以上分析,网络演算能为流量特性与网络资源之间的关系提供直观、准确和实时的描述。因此,网络演算也能为进一步辅助和增强TSN的确定性传输机制提供可能性,且已有部分研究开始采用网络演算为时间敏感网络中的时间关键流(CT, time-critical traffic)评估时延上界。近年来,在多交换机网络场景中,使用网络演算进行TSN中时延边界分析的研究大多采用的是实现过程较为简单的TFA算法。Ren等^[14]考虑时间触发(TT, time-triggered)业务流的确定性传输时隙,基于TFA算法建立AVB流的时延分析模型,并准确地描述了具有实时需求的AVB流量到达和输出过程。贾惠彬等^[15]结合TAS机制,利用TFA算法提出了变电站报文传输的端到端时延上界计算方法,为基于TSN的智能变电站业务端到端时延分析提供了理论计算依据。于文思等^[16]结合TSN提出了基于输入-输出曲线的端到端时延计算模型,并通过风电场通信网算例验证了模型的可行性。Zhao等^[17]基于预设的GCL,为每个输出端口设定流量类型和对应优先级,使用TFA算法分析单条时间敏感类业务的端到端最差时延(WCD, worst-case delay)。在此基础上,Zhao等^[18]又考虑连续节点相同优先级队列门控的相对位置关系,提供了一种基于网络演算的可靠验证方法来指导TSN交换机中的GCL配置。Khaled等^[19]提出了一种灵活窗口重叠调度(FWOS, flexible window-overlapping scheduling)算法,该算法可以被用于优化不同队列间的最大重叠比例,为软实时流量最大化可用带宽。

综上所述,在不同地面网络场景中,已有相关工作应用网络演算算法,或将其结合TSN机制计算业务流时延上界,并取得了良好效果。然而,将以上方法引入LEO卫星通信系统时仍需进行改进。首先,由于服务曲线建模精度的不足,DNC计算的时延上界可能大幅高于真实值而造成时延估计的值偏“悲观”,无法满足卫星业务的时延QoS需求;其次,大部分研究忽略了TSN中同优

先级业务流干扰对服务曲线建模的影响。然而,LEO卫星网络中会接入大量地面和卫星网络业务,同优先级流量干扰不可忽略。最后,现有algDNC算法计算复杂度高,会占用卫星节点大量计算资源,亟须一种兼顾高精度与低复杂度的网络演算算法。

2 基于网络演算的DGA-LEO架构

2.1 DGA-LEO架构概述

基于以上分析,本文构建了一种基于网络演算的LEO卫星网络时延保障架构DGA-LEO,如图2所示。

1) 控制面

基于软件定义网络(SDN, software-defined network)的控制器通过分离控制面和数据面,便于整合卫星和地面网络以进行智能化的资源调度,并满足卫星网络的实时性、灵活性和扩展性需求^[20-21]。本文假设SDN控制器部署在计算资源充足的GEO卫星上。地面任务接入LEO卫星后,任务需求传至邻近的SDN控制器中计算最佳路由及信道资源分配。本文研究重点为构建LEO卫星节点的信道服务模型,在路由信息已知的前提下,采用本文构建的基于网络演算的LEO卫星网络时延分析模型计算端到端时延上界,并将其作为评估所规划的路径是否符合传输任务QoS需求的依据。若计算出的

时延上界超出任务QoS需求,则需重新规划传输路径和资源分配方案。

2) 数据面

地面网络、LEO卫星时延保障传输网络构成了DGA-LEO架构中的数据面部分。该方式能降低卫星节点计算负担与成本,简化后的卫星节点仅负责完成地面各类业务到LEO卫星星座的接入控制、解析控制信令和数据转发功能,减少了星上计算资源的消耗。此外,数据面在地面和LEO卫星之间提供确定性传输路径,LEO卫星节点融合了TAS调度机制后,能进一步保障端到端传输的低时延和高可靠性,适用于对实时性要求较高的卫星通信业务。

2.2 时间感知整形机制概述

基于TAS机制的TSN交换机节点示意如图3所示。GCL根据优先级将TSN队列上的时隙资源分配给不同种类的流量。业务流从上游交换机节点输出后通过入端口输入当前交换机,然后不同种类的流量通过交换机结构转发到交换机出端口。TSN在一个出端口提供了8个优先级队列。IEEE 802.1Qci中定义的优先级过滤器根据流量优先级进行队列映射,队列优先级由嵌入在IEEE 802.1Q帧报头中的优先级码位标记,然后传输选择算法决定传输哪个队列的数据帧。在通过门控转发之后,业务流通过当前交换机的出端口被转发到下游交换机。TAS采用一种基于时间触发的门控机制去使能优先级队列

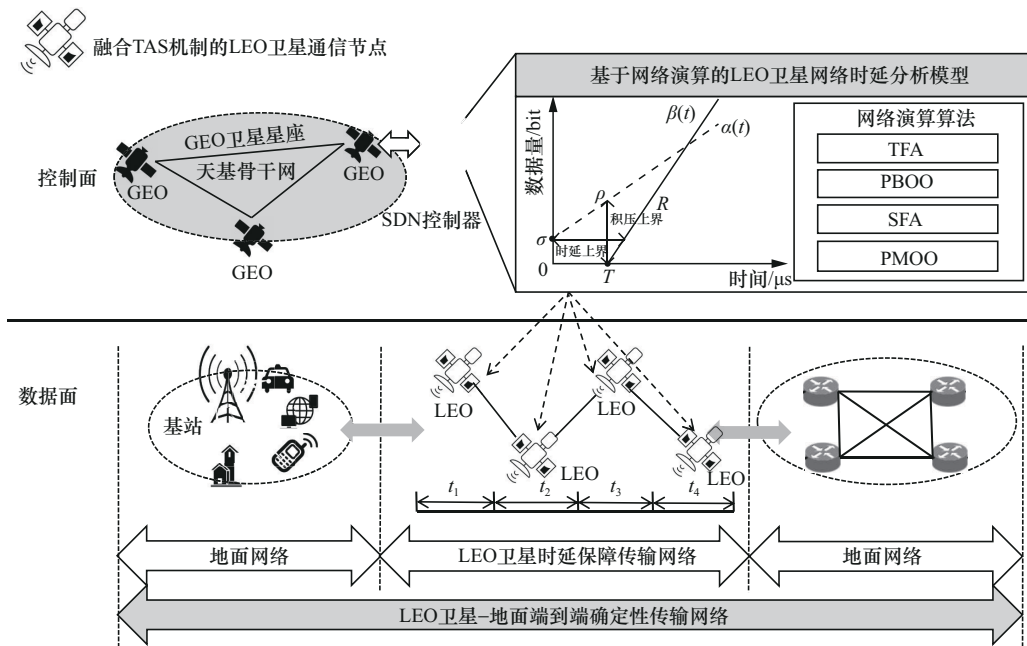


图2 基于网络演算的LEO卫星网络时延保障架构

的传输状态。当且仅当门控状态为“OPEN”时队列上的数据帧可以被发送，否则数据帧将在队列上进行缓存，直到门控状态由“CLOSE”转变为“OPEN”。一旦GCL被设置完成，将会按照其循环大小周期性执行。

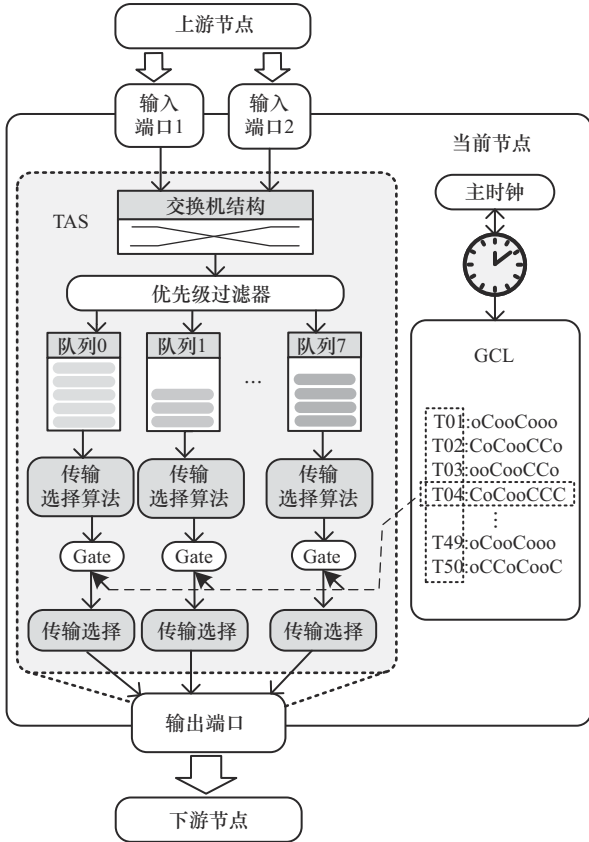


图3 基于TAS机制的TSN交换机节点示意

2.3 网络演算时延上界计算方法

到达曲线 $\alpha(t)$ 和服务曲线 $\beta(t)$ 间的最大水平距离为流量经过交换机的时延上界。在某个交换机中，将流量在时间间隔 t 内经历的时延用 $d(t)$ 表示，即

$$d(t) \leq h[\alpha(t), \beta(t)] = \sup_{s \geq 0} \{ \inf \{ \tau \geq 0 | \alpha(s) \leq \beta(s + \tau) \} \} \quad (1)$$

其中， $\sup_{s \geq 0} \{ \}$ 表示函数在区间 $[s, +\infty)$ 的上确界， $d(t)$ 的最大值表示由网络演算计算出的时延上界。

3 LEO 卫星网络时延上界分析模型

3.1 系统模型与时延分析

1) 业务到达模型

假设有 n 种类型的地面时间关键型流量传输接

入同一个给定的LEO卫星网络，流量集合表示为 $CT = \{CT_1, CT_2, \dots, CT_n\}$ ，每种CT流有各自的到达曲线和提前规划好的传输路径。第 k 条CT业务流由元组 $CT_k = \{R_{CT_k}, l_{CT_k}, T_{CT_k}, q_{CT_k}\}$ 定义，元组内的元素分别表示 CT_k 流量的路由集合、数据帧大小、周期和数据帧数目。假设 CT_k 的数据到达过程用典型的漏桶模型表示，即

$$\alpha_{CT_k}(t) = \begin{cases} \rho_{CT_k} t + \sigma_{CT_k}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中， σ_{CT_k} 表示 CT_k 流量的最大突发量，其值等于 l_{CT_k} ； ρ_{CT_k} 表示最大平均传输速率，其值等于 $\frac{l_{CT_k}}{T_{CT_k}}$ 。

规定 CT_k 流量在卫星网络节点 s_i 的输出到达曲线为

$$\alpha_{CT_k}^{s_i}(t) = \alpha_{CT_k}^{s_i}(t + \bar{D}) \quad (3)$$

其中， \bar{D} 表示该流量在节点 s_i 经历的时延上界。

2) 网络模型

一颗LEO卫星-地面端到端确定性传输网络主要由LEO卫星、地面网络和全双工模式的星间链路构成。网络拓扑建模为一个无向图 $G = (S, E)$ ，其中， $S = ES \cup SW$ 是地面终端 (ES) 和LEO卫星网络节点 (SW) 的集合， E 是所有星地或星间节点间的链路集合，每一条链路由二维变量 (s_i, s_j) 表示，其中 s_i 和 s_j 是2个相邻的节点。例如，如果流量 CT_k 的传输路径由集合 $R_{CT_k} = \{ES_1^{CT_k}, s_i^{CT_k}, s_j^{CT_k}, ES_2^{CT_k}\}$ 表示，则说明 CT_k 在卫星网络中从源节点 ES_1 出发，经过节点 s_i 和 s_j 到达目的节点 ES_2 。

3) 卫星网络业务端到端时延分析

在LEO卫星网络中进行传输之前，地面任务的需求将被转发到SDN控制器，控制器为其计算出在卫星网络中合适的传输路径。假设业务经历的端到端时延包括经过控制器的流量设置时延和经过LEO卫星网络的总传输时延。流量设置时延由从LEO卫星节点传输到控制器的时延、控制器的计算时延和从控制器传输返回LEO卫星节点的时延3个部分构成。假设 CT_k 流量从LEO卫星节点接入并传输到邻近的GEO卫星控制节点，2个卫星节点的距离为 $dis_{CT_k}^{LG}$ ，在真空中无线电的传播速率为 sp_{radio} ，在控制器中的路由与时延计算时延为定值 d_{com} ，则

流量 CT_k 的设置时延 D_{set,CT_k} 为

$$D_{\text{set},CT_k} = \frac{2\text{dis}_{CT_k}^{\text{LG}}}{\text{sp}_{\text{radio}}} + d_{\text{com}} \quad (4)$$

定义流量经过一条星间链路 (ISL, inter-satellite link) 的单跳时延包括在输入节点的排队时延、处理时延、发送时延和该链路的传播时延。假设各节点对流量的转发速率同为 BW_s , 节点对业务的处理速度为 sp_{pro} , CT_k 经过的其中2个节点 s_i 和 s_j 之间的距离为 $\text{dis}_{CT_k}^{s_i,s_j}$, CT_k 在 s_i 中的排队时延用构建的网络演算模型计算, 由参数 $d_{\text{que},CT_k}^{s_i}$ 表征, 则 CT_k 在 s_i 和 s_j 之间经历的总时延为

$$D_{\text{trans},CT_k}^{s_i,s_j} = \frac{l_{CT_k}}{\text{BW}_s} + \frac{l_{CT_k}}{\text{sp}_{\text{pro}}} + \frac{\text{dis}_{CT_k}^{s_i,s_j}}{\text{sp}_{\text{radio}}} + d_{\text{que},CT_k}^{s_i} \quad (5)$$

假设 CT_k 在 s_{into} 卫星接入、 s_{out} 卫星输出, 流量在传播过程中通过无线电传输 (速率为光速), 则 CT_k 经历的端到端时延为

$$D_{\text{cte},CT_k} = D_{\text{set},CT_k} + \sum_{(s_i,s_j) \in R_{CT_k}} D_{\text{trans},CT_k}^{s_i,s_j} + \frac{l_{CT_k}}{\text{BW}_s} + \frac{h_{s_{\text{into}}} + h_{s_{\text{out}}}}{\text{sp}_{\text{radio}}} \quad (6)$$

其中, h_{s_i} 表示 s_i 卫星与地面输入/输出节点的距离。

3.2 基于TAS的单卫星节点服务曲线构建

在基于TAS机制的路由与调度算法研究中, 大多假设不同队列门控互不干扰。但由于GCL配置的多样性, 不同优先级门控可能重叠, 从而影响流量时延。Zhao等^[17]分析了最坏情况下不同队列门控间的重叠场景及对流量时延上界的影响, 并在单节点服务曲线建模时考虑了高、低优先级门控及保护带的影响。本文在构建单节点服务曲线时参考了该方法, 并提炼出关键过程。

假设在卫星节点 s_i 的出端口有8个传输队列 Q_{P_m} , P_m 表示队列优先级, $m \in [0,7]$, 优先级从0到7依次升高。将考虑不同优先级队列间和保护带的影响后得到的关键参数代入式(7)中, 得到以时隙 i 为基准并由时隙 j 提供的服务曲线。

$$\beta_{P_m}^{j,i}(t) = \beta_{T_{\text{GCL}},G_{P_m}^j}(t + T_{\text{GCL}} - G_{P_m}^j - W_{P_m}^i - O_{P_m}^{j,i}) \quad (7)$$

其中, T_{GCL} 是所有队列流量的超周期, $G_{P_m}^j$ 是 Q_{P_m} 队列上的传输时隙 j 中能提供给流量确定性传输服务的保障时隙长度, $W_{P_m}^i$ 是最大等待时延, $O_{P_m}^{j,i}$ 是

第 i 个保障时隙开始时间和第 j 个保障时隙开始时间之间的偏移量。

$\beta_{T,G}(t)$ 是基于时分多址 (TDMA, time division multiple access) 的经典服务曲线表达式, 计算方法如式(8)所示。

$$\beta_{T,G}(t) = C \max \left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor L, t - \left\lceil \frac{t}{T} \right\rceil (T - G) \right) \quad (8)$$

其中, C 表示链路带宽。

综上所述, 以时隙 i 为基准的 Q_{P_m} 队列服务曲线如式(9)所示。

$$\beta_{P_m}^i(t) = \sum_{j=i}^{i+N_{P_m}-1} \beta_{P_m}^{j,i}(t) \quad (9)$$

其中, N_{P_m} 为该队列上一个超周期内门控时隙的个数, 队列门控及对应的服务曲线如图4所示。

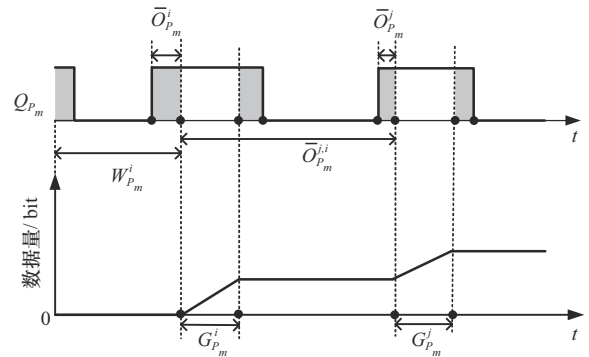


图4 队列门控及对应的服务曲线

卫星节点 Q_{P_m} 队列的总服务曲线为以该队列上所有时隙为基准的服务曲线的下包络线, 如式(10)所示。

$$\beta_{P_m}^{s_i}(t) = \min_{1 \leq i \leq N_{P_m}} \{ \beta_{P_m}^{j,i}(t) \} \quad (10)$$

3.3 改进的服务曲线建模方法

传统algDNC算法中的SFA和PMOO算法均考虑了同队列干扰流的影响^[10-11], 通过代数运算符“ \ominus ”扣除干扰流的到达曲线, 获得节点为观察流提供的“剩余服务曲线”。其中, SFA算法逐节点计算剩余服务曲线后进行卷积, PMOO算法则先卷积节点服务曲线再扣除干扰流到达曲线。以上算法的优势在于考虑了同优先级干扰后能针对特定流量评估更准确的时延。但当网络中存在大量错综复杂的业务流传输时, 大量代数运算符的使用可能会带来很高的算法复杂度和计算时延, 这也是大多数相

关工作采用 TFA 算法的原因，直接累加各节点采用网络演算计算的时延而没有采用运算符进行复杂计算。然而根据前文的分析，TFA 算法同样存在缺陷。为此，本文结合 TAS 门控调度机制和卷积定理^[13]，考虑了到达同一优先级队列同一门控内部的多个干扰数据帧的影响，提出了一种新的计算剩余服务曲线（NLSC-based, new computation of left-over service curve based）的 algDNC 算法。

图 5 为改进的服务曲线建模方法示意。时隙 i 和时隙 j 分别是位于队列 Q_{P_m} 上的 2 个相邻的传输时隙。假如流量 CT_k 在该队列上进行传输时受到 q_{CT_l} 条同优先级流量 CT_l 的干扰，区间 $[G_{P_m}^{i,o}, G_{P_m}^{i,c}]$ 是由 4.2 节方法计算得出的保障时隙，普通情况下干扰数据帧可能会在时隙 i 中的任意时刻到达，但本文在构建服务曲线时是基于存在最坏情况下干扰的原则，因此，为了让观察流 CT_k 位于“最晚时间”得到转发服务，默认所有干扰数据帧在时隙 i 的开始时刻依次到达。定义所有干扰数据帧的到达时刻 $\Delta_{P_m, CT_l}^{i, in}$ 和结束时刻 $\Delta_{P_m, CT_l}^{i, out}$ 构成干扰区间 Δ_{P_m, CT_l}^i 。以上方法构建的服务曲线 $\beta_{P_m}^{s_i, CT_k}(t)$ 用图 5 中的虚线表示，4.2 节方法构建的服务曲线用黑实线表示，前者服务时隙更晚且服务时长更短。假设 CT_k 经过了 2 个相邻节点 s_i 和 s_j ，用改进算法计算了各节点剩余服务曲线后，结合卷积定理，得出 2 个节点的总服务曲线，如式(11)所示。

$$\beta_{P_m}^{R_{CT_k}, CT_k} = \beta_{P_m}^{s_i, CT_k} \otimes \beta_{P_m}^{s_j, CT_k} \quad (11)$$

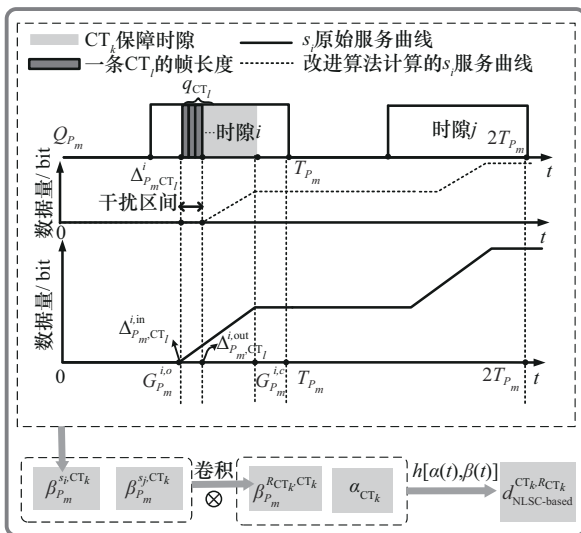


图 5 改进的服务曲线建模方法示意

4 仿真分析

为验证和评估本文提出的 DGA-LEO 架构和基于网络演算的 LEO 卫星网络时延上界分析方法，本文基于经典 LEO 卫星星座——铱星 (Iridium) 星座的轨道参数配置展开仿真。铱星是由 66 个运作中的通信卫星组成的 LEO 卫星通信系统，其星间链路与全球覆盖特性可有效支持空天地一体化网络架构的仿真验证。铱星系统的天基网络层通过星间链路实现自主组网，地面网络层与用户终端互联，其分层结构符合空天地一体化架构中“天地协同”的核心逻辑，同时为验证 DGA-LEO 架构中的 LEO 卫星网络时延分析模型提供了基础场景。需要强调的是，铱星星座仅作为本文采用的仿真案例，DGA-LEO 架构同样适用于其他 LEO 卫星网络（如 OneWeb、Starlink），其核心方法不依赖于特定星座的卫星轨道和链路配置，而在于卫星节点到达曲线、服务曲线的建模和时延上界的计算。

本节的数值仿真在 Python 环境中进行。为验证传统的几种网络演算算法和本文提出的网络演算算法的有效性和准确度，在同样的仿真参数配置下，利用仿真平台对业务流的时延上界进行测试。仿真平台采用北京科技大学工业互联网研究院自研的 TSN 仿真系统。所有实验均运行于 AMD Ryzen 5 4 600H 3 GHz CPU 与 16 GB RAM 的 Windows 计算机。铱星星座部分参数及仿真配置如表 1 所示。

表 1 铱星星座部分参数及仿真设置

参数	参数值
轨道高度/km	780
轨道平面数	6
单轨道卫星数	11
轨道倾角	86.4°
轨道面间隔	27°
缝隙夹角	22°
相邻轨道面夹角	31.6°
ISL 带宽/(Mbit·s ⁻¹)	500
星间链路平均长度/km	2 800
无线电传播速率/(m·s ⁻¹)	3×10 ⁸
地面源节点和卫星的发送速率/(Gbit·s ⁻¹)	1
卫星服务速率/(Gbit·s ⁻¹)	1

4.1 业务和网络模型设计

图6为LEO卫星-地面业务传输示例。假设有室内、交通、海洋和沙漠4种同等优先级的地面关键型业务接入铱星星座的同一卫星节点 s_1 ，经过卫星网络后传入地面控制中心进行数据接收与分析。位于GEO卫星的SDN控制器为这4种业务流计算的传输路径为：室内、交通和海洋3种业务的路径相同，均经过 s_1 、 s_2 和 s_3 节点，沙漠业务经过 s_2 和 s_3 节点。4种业务会在3个卫星节点的出端口队列上竞争同一出端口。其中，室内业务视为观察业务（计算该业务的时延上界）并由参数 CT_{ob} 表示，交通、海洋和沙漠3种业务视为同优先级干扰业务，分别用参数 CT_1 、 CT_2 和 CT_3 表示，业务模型参数如表2所示。

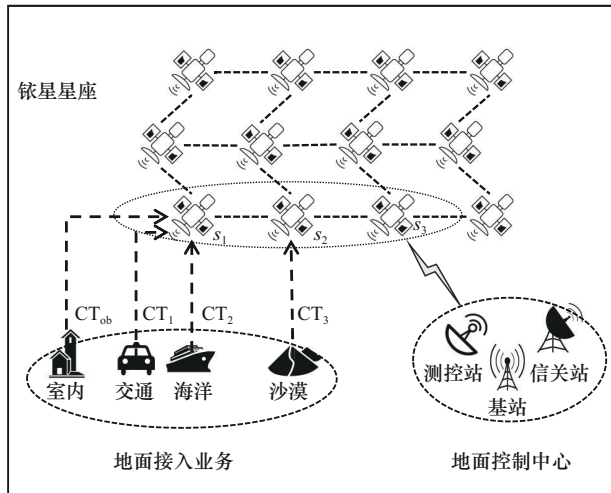


图6 LEO卫星-地面业务传输示例

表2 业务模型参数

流量类型	流量特征			
	优先级	发送周期/ μs	帧大小/B	源节点到达曲线
CT_{ob}	6	150	500	$\alpha_{CT_{ob}}(t) = 26.7t + 4\ 000$
CT_1	6	150	400	$\alpha_{CT_1}(t) = 21.3t + 3\ 200$
CT_2	6	150	350	$\alpha_{CT_2}(t) = 18.7t + 2\ 800$
CT_3	6	150	300	$\alpha_{CT_3}(t) = 16t + 2\ 400$

为了分析简便，仅采用和分析3个传输队列，队列门控周期与流量周期相同。各卫星节点的GCL配置参数如表3所示，其中， ES^* 表示任意地面终端节点。

表3 GCL配置参数

优先级队列	各节点各队列门控开启-关闭时间			门控周期/ μs
	$[s_1, s_2]$	$[s_2, s_3]$	$[s_3, ES^*]$	
7	[45,80]	[55,90]	[55,90]	150
6	[85,125]	[95,135]	[110,150]	150
5	[120,140]	[140,160]	[190,210]	150

4.2 仿真结果及分析

1) 改进网络演算算法性能测试

在图6的 s_1 节点中测试改进的网络演算算法的性能，假设有一条观察流 CT_{ob} 和同优先级干扰流 CT_1 传输到 s_1 节点的同一出端口。经计算得出保障时隙的长度为 $36.8\ \mu s$ ，将保障时隙长度除以该队列传输流量的最大数据帧长度，得出在该时隙中最多允许传输9条业务流，否则可能引起拥塞。将干扰流 CT_1 的条数逐条增加到8，分别采用传统剩余服务曲线计算方法和改进剩余服务曲线计算方法计算 CT_{ob} 在该节点经历的时延上界，实验结果如图7所示。随着干扰流数目的增加，2种方法下的时延上界值都逐渐增加，且改进方法较传统方法能降低时延上界评估结果的悲观性，得到更低的时延上界估值。

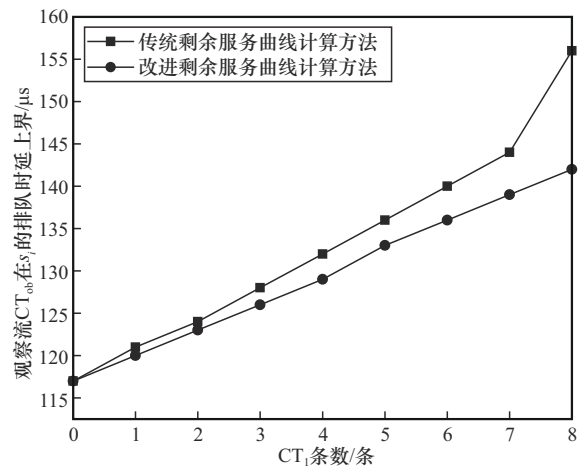
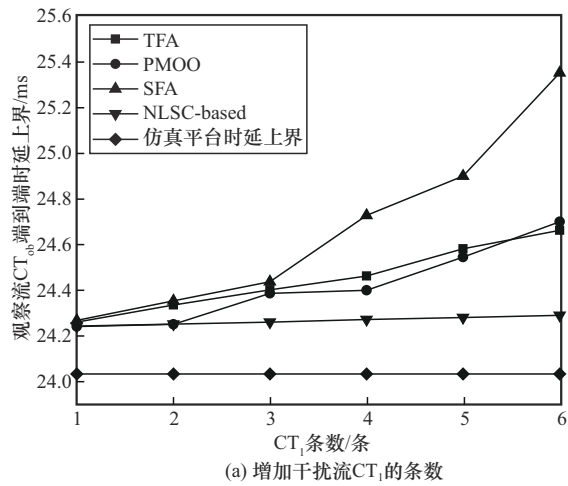


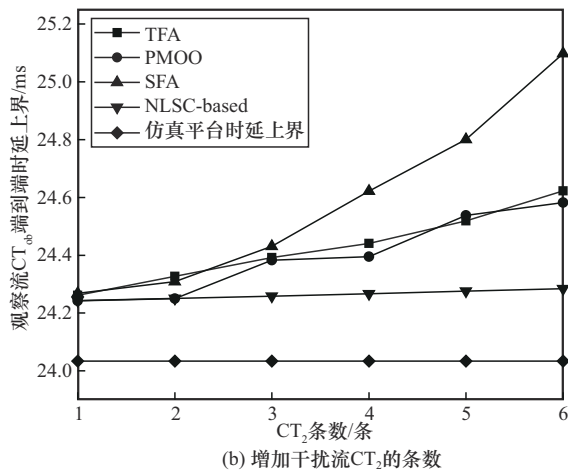
图7 基于不同算法的节点时延上界对比

2) 多种网络演算算法性能测试

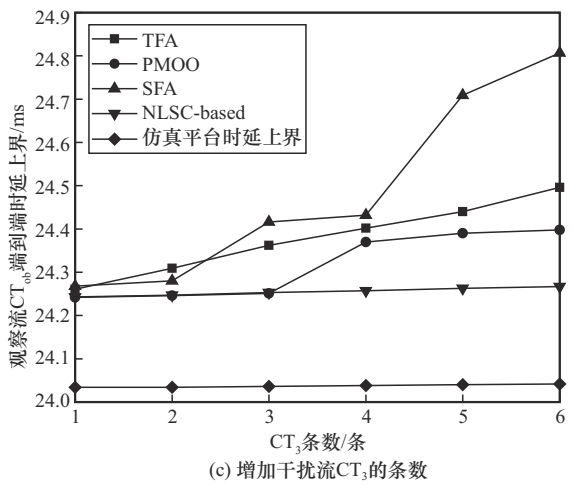
为了探究改进的网络演算算法评估时延上界的有效性和准确性，在图6所示的拓扑中，采用TFA算法、PMOO算法、SFA算法和NLSC-based网络演算算法分别计算观察流 CT_{ob} 的端到端时延上界。4种业务的数据帧数目至少为1，分别增加3种干扰业务流的数目，对比不同代数类网络演算算法的表现情况，实验结果如图8所示。



(a) 增加干扰流CT₁的条数



(b) 增加干扰流CT₂的条数



(c) 增加干扰流CT₃的条数

图8 基于不同算法的多节点时延上界对比

由图8可知，一方面，所有算法计算的流量时延上界均随着干扰流条数的增加而增加，且各算法计算出的时延上界均在仿真平台测试结果之上，这验证了各算法的有效性。另一方面，3种情况下NLSC-based网络演算算法均表现出最好的性能，即计算的时延上界值更趋近于仿真平台测试的时延

上界，相较TFA、PMOO和SFA算法大大降低了评估结果的悲观性。同时，改进算法的计算结果不会随着干扰流条数的增加而激增，而是平稳变大。

此外，该实验结果也验证了TFA、PMOO和SFA的算法特征。由于SFA算法在流量经过的每个节点时都会计算该节点的剩余服务曲线，采用了过多的剩余服务曲线运算符意味着最终的服务曲线会出现很大程度的右移，从而使计算出的时延上界值悲观性较大。PMOO算法相较于SFA算法一次性考虑了同优先级干扰流的干扰，因此时延计算结果较SFA小。虽然TFA算法在多数情况下结果优于SFA和PMOO算法，但该算法在计算观察流时延时既没有考虑节点间的影响，也没有考虑同优先级流量的干扰，计算出的时延值不一定准确。综上所述，本文提出的改进网络演算算法无论是在服务曲线的建模还是在时延评估的结果上，都比2种传统的algDNC算法具有更高的准确度。

算法计算时长也是评估网络演算算法性能优劣的重要指标。因此，对应图8(a)中的实验，记录各algDNC算法计算CT_{ob}时延上界的时长，实验结果如图9所示。运算符的大量使用使SFA和PMOO算法具有很高的计算复杂度及很大的计算时长。TFA算法将各节点时延上界直接相加，计算时长较低，因此在很多研究工作中被采用。本文提出的改进网络演算算法计算时长稍低于TFA算法，在4种算法中具有最小的计算时长。

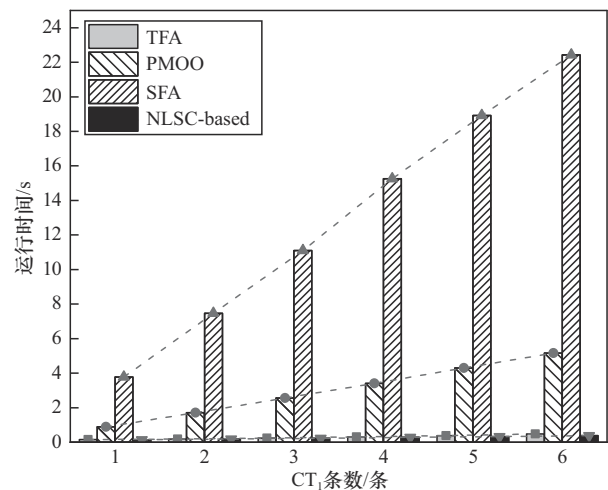


图9 各算法随干扰流条数增加的运行时间

5 结束语

本文在推进空天地一体化网络背景下，针对构

建LEO卫星-地面端到端确定性传输网络的需求,进行了基于网络演算的LEO卫星网络时延上界分析研究。首先,提出了一种LEO卫星网络时延保障架构,结合网络演算与TAS调度机制为传入的各种关键业务分析时延上界。其次,结合TAS机制和LEO卫星网络特性,构建了改进的服务曲线建模方法NLSC-based,在构建单节点服务曲线时考虑了同优先级流量干扰。最后,将提出的NLSC-based算法与3种传统的代数类确定性网络演算算法进行对比,实验结果表明,本文提出的改进方法在多条同优先级流量干扰下,时延评估结果更接近仿真平台模拟的时延上界值,并显著缩短了计算时长。

综上,本文提出的基于网络演算的LEO卫星网络时延保障架构能在兼顾准确度和计算复杂度基础上,为进一步构建LEO卫星-地面端到端确定性传输网络提供QoS保障。然而本文工作仍有待改进之处。首先,本文提出的时延保障架构仍处愿景阶段,时延上界评估模型基于已知路由,未来将结合多路径选择构建网络演算动态评估模型;其次,进一步结合卫星网络的动态特性和传输机制,更精确地刻画业务和卫星节点服务模型;最后,进一步拓展DGA-LEO架构在大规模LEO卫星星座(如Starlink、OneWeb)中的适用性分析,探讨其在不同星座架构下的性能表现。

参考文献:

- [1] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228.
- [2] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. *物联网学报*, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3): 3-19.
- [3] 曹欢, 陈岩, 周一青, 等. 空天地网络确定性服务架构、挑战及关键技术[J]. *西安电子科技大学学报*, 2023, 50(3): 1-18.
CAO H, CHEN Y, ZHOU Y Q, et al. Deterministic service of space-air-ground integrated networks: architecture, challenges and key technologies[J]. *Journal of Xidian University*, 2023, 50(3): 1-18.
- [4] 彭国宇, 汪硕, 李桂珍, 等. 空天地一体化确定性网络研究[J]. *电信科学*, 2023, 39(11): 13-26.
PENG G Y, WANG S, LI G Z, et al. Research on space-air-ground integrated deterministic networking[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(11): 13-26.
- [5] 胡富国. 面向分布式平台的确定性网络关键技术研究[实现][D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
HU F G. Research and implementation of key technologies of deterministic network oriented to distributed platform[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [6] JIANG X F, HUANG Y H, LI J J, et al. Spatio-temporal routing, redundant coding and multipath scheduling for deterministic satellite network transmission[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(5): 2860-2875.
- [7] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- time-sensitive networking for fronthaul: IEEE 802.1CM-2018[S]. 2018.
- [8] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. *计算机学报*, 2021, 44(7): 1378-1397.
CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [9] 孙雷, 王健全, 朱瑾瑜, 等. 时间敏感网络技术及其发展趋势[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
SUN L, WANG J Q, ZHU J Y, et al. Time-sensitive networking technology and development trend[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2022.
- [10] BOUDEC J Y L, THIRAN P. Network calculus: a theory of deterministic queuing system for the Internet[M]. Berlin: Springer, 2001.
- [11] BEMTEN A V, KELLERER W. Network calculus: a comprehensive guide[M]. Munich: Technische Universitat Munchen, 2016.
- [12] BONDORF S, NIKOLAUS P, SCHMITT J B. Quality and cost of deterministic network calculus[J]. *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*, 2017, 1(1): 1-34.
- [13] TANG Y, JIANG Y M, JIANG X, et al. Pay-burst-only-once in real-time calculus[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 25th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [14] REN J, YANG D, CUI E F, et al. An analytical latency model for AVB traffic in TSN considering time-triggered traffic[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 938-943.
- [15] 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]. *电力系统自动化*, 2023, 47(1): 192-199.
JIA H B, HU Z H, WU K, et al. Calculation method for maximum time delay of substation communication network based on time-sensitive networking[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(1): 192-199.
- [16] 于文思, 高会生. 基于网络演算的TSN端到端最差时延分析[J]. *集成电路应用*, 2021, 38(1): 10-12.
YU W S, GAO H S. Analysis of the worst end-to-end delay of TSN based on network calculus[J]. *Application of IC*, 2021, 38(1): 10-12.
- [17] ZHAO L X, POP P, CRACIUNAS S S. Worst-case latency analysis for IEEE 802.1Qbv time sensitive networks using network calculus[J].

IEEE Access, 2018, 6: 41803-41815.

- [18] ZHAO L X, POP P, GONG Z J, et al. Improving latency analysis for flexible window-based GCL scheduling in TSN networks by integration of consecutive nodes offsets[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5574-5584.
- [19] SHALGHUM K M, NOORDIN N K, SALI A, et al. Network calculus-based latency for time-triggered traffic under flexible window-overlapping scheduling (FWOS) in a time-sensitive network (TSN)[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3896.
- [20] 廖新悦, 张然, 黄正璇, 等. 空间卫星网络组网与管控技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 48-58.
LIAO X Y, ZHANG R, HUANG Z X, et al. Review on networking and control technologies of space satellite network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 48-58.
- [21] ZHANG T, LI J D, LI H Y, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(2): 179-185.

[作者简介]



王慧姊 (1999-), 女, 贵州遵义人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为空地一体化组网、时间敏感网络时延分析、时间敏感网络路由与调度机制等。



孙雷 (1984-), 男, 贵州安顺人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信技术、时间敏感网络、工业确定性网络、5G与时间敏感网络协同传输技术、异构网络联合资源管理机制等。



王健全 (1974-), 男, 山西平遥人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业泛在网络、工业互联网、工业互联网安全、网络协同与智能制造等。

林尚静 (1986-), 女, 湖北武汉人, 博士, 北京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为卫星通信技术、无线资源管理、数据驱动的5G网络优化等。

王卓群 (2000-), 女, 河南开封人, 北京科技大学硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络联合路由与调度机制、工业互联网。

Sun Kewen (1979-), 男, 博士, 英国布拉德福德大学副教授, 主要研究方向为卫星通信与导航、导航抗干扰、现代信号处理。