

基于可满足性模理论的时间敏感网络流量调度机制

徐晶 刘春龙 霍佳皓 皇甫伟

北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083

(xj2018@ustb.edu.cn)

摘要 在全球范围内,工业化、信息化与智能化的融合正对各行各业产生深远影响,尤其在车载系统、航空电子及工业自动化等对时延要求极为严格的领域,时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)已逐步确立其作为实现确定性低延迟通信的核心地位。尽管 TSN 在时敏业务中的应用日益广泛,但其当前提供的网络级流量调度机制仍难以充分满足上层业务对优先级的复杂需求。文中提出了一种基于可满足性模理论(Satisfiability Modulo Theories, SMT)的 TSN 调度机制——SMT-TAS 调度机制。该机制基于现有的时间感知整形(Time Aware Shaper, TAS)模型,引入 SMT 求解系统,并提出基于优先级满足率的流量调度算法,使其可以基于动态业务场景,实时生成最优调度方案,更新至门控生成列表,实现动态流量调度优化。实验结果表明,与传统的 TAS 方法相比,所提出的 SMT-TAS 机制在不同时间敏感流数量下的优先级满足率方面平均提高了 20% 左右,大大增强了系统的可调度性。同时,该算法在求解性能上也表现出色,端到端时延降低了 10% 左右,有效满足了 TSN 调度的各项约束条件,为 TSN 的进一步发展与应用提供了有力支持。

关键词: 时间敏感网络; 可满足性模理论; 流量调度; 优先级保障

中图分类号 TP393

Traffic Scheduling Mechanism for Time-sensitive Networks Based on Satisfiability Modulo Theories

XU Jing, LIU Chunlong, HUO Jiahao and HUANGFU Wei

School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Globally, the fusion of industrialization, informatization, and intelligence is significantly impacting various industries, especially in fields requiring stringent latency, such as in-vehicle systems and avionics. TSN has emerged as a key technology for achieving deterministic low-latency communications. However, TSN's current network-level traffic scheduling mechanisms struggle to fully meet the complex priority demands of upper-layer services. To address this issue, this paper proposes an SMT-based TSN scheduling mechanism called SMT-TAS. By incorporating an SMT solver into the existing TAS model, and designing a traffic scheduling algorithm based on priority satisfaction rate, SMT-TAS enables real-time generation of optimal scheduling schemes based on dynamic business scenarios. Experimental results demonstrate that compared to traditional TAS methods, SMT-TAS improves the average priority satisfaction rate by approximately 20%, significantly enhances system schedulability, and reduces end-to-end latency by around 10%, demonstrates outstanding performance in terms of solving efficiency. Furthermore, it exhibits higher stability and reliability in large-scale tasks, effectively meeting various TSN scheduling constraints, providing strong support for the further development and application of TSN.

Keywords Time sensitive networking, Satisfiability modulo theories, Traffic scheduling, Priority assurance

1 引言

随着互联网、物联网及工业自动化的飞速发展,网络技术正面临数据量剧增、带宽需求飙升及实时处理与连接可靠性要求提升等多重挑战。特别是在工业自动化领域,设备间通信需达到毫秒乃至微秒级的低延迟^[1],这对现有网络架构及协议设计提出了更高要求。在此背景下,时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)作为一种新兴技术框架应运而生,旨在满足这些严苛需求。

TSN 标准的发展始于 2006 年,由 IEEE 802.1 工作组的音视频桥接(Audio Video Bridging, AVB)专项小组提出,后

于 2012 年扩展研究范围并升级为 TSN,专注于制定一系列标准以满足实时应用的确定性低延迟通信需求,其中的核心标准包括精确时间协议、时间感知队列及低延迟音视频桥接等^[2-4],共同确保 TSN 在以太网上实现关键任务数据流的服务质量(Quality of Service, QoS)需求。

针对 TSN 中的流量调度问题,研究者们开发了多种算法与技术方。早期的研究多通过整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)方法进行数学建模,并为 TSN 交换机构建转发时间表,从而确保时间触发(Time-Triggered, TT)流能够以极低的延迟和抖动水平实现实时传输^[5]。文献[6]将 ILP 与 GRASP 启发式算法结合,通过强制帧隔离来限制排

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A2005);科技部国家重点研发计划子课题(2022QY1403)

This work was supported by the Key Program of the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U22A2005) and Sub-project of the National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2022QY1403).

通信作者:刘春龙(2433968461@qq.com)

队,实现了 TT 流与 AVB 流的协同调度。文献[7]引入了基于可满足性模理论(Satisfiability Modulo Theories, SMT)的求解策略,通过精确计算每个出口端口的传输窗口布局 and 大小,在显著提升调度查找效率的同时实现了网络平均抖动的有效降低。文献[8]则基于可分性理论提出了一种流序列分析方法,通过分析流的冲突和依赖性,设计了一种增量调度算法,降低了调度的复杂度。文献[9-10]从网络架构的角度出发,基于时间敏感的软件定义网络(Time Sensitive Software Defined Network, TSSDN)提出了不同的流调度方案。其中,文献[9]提出了一种增量调度算法,利用软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的全局视图,实时调整时间触发流的传输计划,以实现高效的增量调度。文献[10]则构建了一种流调度模型,使其在网络更新过程中确保不丢帧且避免额外开销,同时提供离线和在线两种算法,分别针对调度性和执行效率进行优化。

随着研究的深入,研究者们针对不同流量类型也进行了更加精细化的优化。文献[11]将禁忌搜索算法应用于无等待调度,构建了适用于工厂自动化常见拓扑结构的二阶段分层网络模型,显著提升了调度效率并降低了系统开销。文献[12]提出了一种基于遗传算法的调度方法,通过最小化延迟、抖动和带宽利用率来综合优化流量调度。文献[13]提出了一种考虑可靠性的调度和路由方法,并通过可满足性模理论进行求解,从而有效应对 TSN 中的瞬态故障问题。文献[14]提出了一种基于在线最早截止日期调度方法,能够在保障时效性的同时减少调度延迟。文献[15]提出了一种高效的启发式算法及后处理策略,通过按优先级排序调度流和沿流路径调度帧,实现了端到端延迟的有效降低。文献[16]提出了结合时间感知整形(Time Aware Shaper, TAS)和循环队列转发(Cycling Queuing and Forwarding, CQF)的方法,综合考虑了具有不同实时约束的流量类别,通过启发式方法同步计算所有流量类别的时间表,实现了流量的高效调度。文献[17]则提出了一种针对 TT 流和 AVB 流的组合调度方案,通过启发式方法调度尽可能多的 AVB 流,并对 CQF 机制中的时隙流量进行负载均衡,从而有效减少了抖动,并缩短了调度响应时间。

尽管现有研究在流量调度方面取得了显著进展,但其中的调度机制仍面临诸多挑战,本文特别是在应对上层业务复杂需求方面,现有的调度方案往往依赖于静态规则或简单的优先级分配,这使得它们难以应对高度动态且复杂的网络环境,尤其是在流量需求的优先级满足方面,现有方法存在明显的不足。

针对这一挑战,本文提出了一种 TSN 流量调度方法——SMT-TAS 调度机制。该机制基于时间感知整形机制,引入 SMT 求解系统,使其能够根据网络流量的动态变化和业务需求,实时生成最优的调度方案并即时更新至门控生成列表中,从而实现基于优先级的调度优化。

本文第 2 章将简要介绍时间敏感网络的流量调度机制及可满足性模理论;第 3 章详述所提出的 SMT-TAS 机制及其算法设计,重点说明如何将时间感知整形机制中的门控生成机制与 SMT 求解器结合以实现优化调度;第 4 章通过实验仿真进行验证与分析;最后总结全文并展望未来。

2 理论概述

TSN 是在 IEEE 802.1 框架下制定的一系列协议标准,

涵盖时钟同步、流量调度、网络配置与管理以及可靠性等领域,通过协同工作为以太网提供确定性和可靠性,确保数据实时稳定传输。本研究基于 TAS 机制的流量调度,重点研究 IEEE 802.1Qbv^[3] 标准下的增强型调度机制,并探讨约束求解方法中 SMT 的应用。

2.1 时间敏感网络

在 TSN 中,信息从源节点传输到目的节点,网络通信的基本单元是帧。流量调度旨在规划数据帧在网络各设备上的精确转发时刻。TSN 的数据帧结构(见图 1)依据 IEEE 802.1Q 标准,相较于传统以太网数据帧,增加了 4 字节的虚拟局域网(Virtual Local Area Network, VLAN)标签部分。该标签内,协议标识符用于区分帧的类型;优先级编码占用 3 位,定义了从 0 至 7 的 8 个不同优先级级别;存在丢弃指示位,旨在保障高优先级流量的 QoS,允许在必要时放弃低 QoS 要求的数据;VLAN ID 作为网络标识符,由 12 位构成,能够代表的最大子网数量为 2 的 12 次方,即 4096 个子网。

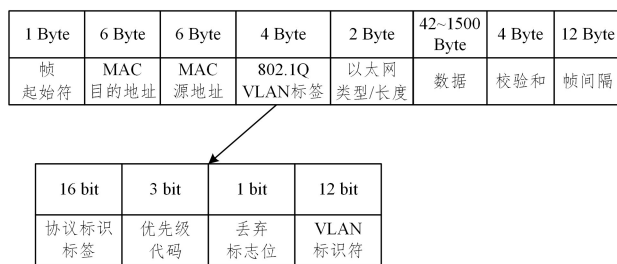


图 1 TSN 数据帧的结构

Fig. 1 Structure of TSN data frame

TAS 是 IEEE 802.1Qbv 标准中支持 TSN 流量调度的核心机制之一^[18],其主要工作机制(见图 2)是通过时间窗口控制数据流的传输顺序和优先级,以满足时延敏感应用的严格要求。受时分多址(TDMA)思想启发,TAS 将通信时间轴划分为多个传输周期,并细分为多个时隙。每个时隙内,优先级队列的门控状态根据需求开启,允许相应流量传输。依据 IEEE 802.1Qbv 标准,TAS 将流量划分为 8 个优先级(0 至 7),每个优先级对应独立队列,高优先级流量(如时间触发流 TT)在指定时隙内优先传输,而低优先级流量(如尽力而为流 BE)则受到合理调配。门控生成机制通过预设队列状态精准控制流量传输,例如,在时间点 T_0 ,当门控状态为 10000010 时,仅 class1 和 class6 队列开启并按优先级顺序发送数据帧,从而确保高优先级流量的传输需求,同时有效利用网络资源处理低优先级流量。

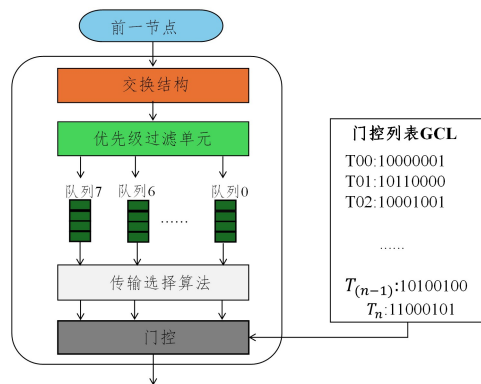


图 2 时间感知整形机制

Fig. 2 Time-aware shaping mechanism

2.2 可满足性模理论

可满足性模理论^[19]是逻辑推理领域的一项关键技术,用于解决特定背景理论下的一阶逻辑公式集合的可满足性问题,即在给定理论框架内寻找变量赋值,使所有公式同时成立。相比传统的布尔可满足性问题(Boolean Satisfiability Problem, SAT),SMT 能够处理非布尔变量和复杂谓词,具备整合多种理论约束的能力,被广泛应用于人工智能、自动化推理和软件工程等领域,如自动定理证明、规划和约束满足问题。常用的 SMT 求解方法有 Eager, Lazy 和 DPLL(T)等,其中 DPLL(T)算法因其在解决大规模且包含复杂理论约束的问题时具有高效性而被广泛采用。可满足性模理论如图 3 所示。

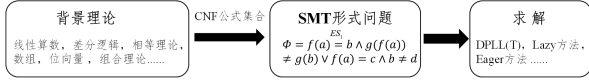


图 3 可满足性模理论

Fig. 3 Satisfiability modulo theories

3 调度机制的设计与实现

在网络流量调度过程中,由于上层业务的动态变化,优先级调度变得极为复杂。现有的 TAS 作为 TSN 的核心技术之一,通过调整门控生成列表保障高优先级流量传输,但面对复杂网络和多变流量需求时,TAS 机制的灵活性和效率仍显不足。针对这一问题,本文提出了 SMT-TAS 机制,该机制结合 SMT 求解的逻辑推理和约束求解能力,对复杂网络进行建模并优化调度策略,提出基于优先级的 TSN 流量调度算法,以实现适应实时网络状态和流量需求的高效调度。

3.1 网络建模与约束设计

在实现 SMT-TAS 调度机制之前,首先对 TSN 流量调度问题进行建模和约束设计。将 TSN 抽象为无向图 $G=(V, L)$,其中 V 代表节点集合,包括交换机集合 SW 和终端系统集合 ES。节点集合 V 中的每个交换机具有多个端口,每个端口包括接收消息的入口和发送消息的出口;而终端系统负责接收和发送数据流,且必须至少连接一个交换机。交换机负责执行数据流的路由选择,其核心组成部分为端口集合,即交换机的端口。集合 L 为由两个节点构成的链路集合,记作 $L=\{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V\}$,代表网络中所有数据链路的集合。数据流经端口发送,选择传输链路的过程即为端口选择。每个端口对应一条链路,即对应图中的一条边。定义 L_i 是一个无周期的有序数据链路序列,它通过交换机将一个发送端系统与一个或多个接收端系统连接起来。TSN 网络拓扑如图 4 所示。

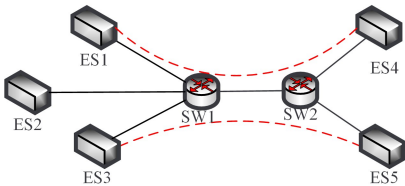


图 4 TSN 网络拓扑

Fig. 4 TSN network topology

应用可满足性模理论对流量进行调度规划时,其关键在于为所构建的时间敏感的时隙模型建立一系列约束条件,将 TSN 流量需求转化为适用于 SMT 求解器的数学约束。

首先,定义时隙模型 t_p 。将输出端口的时间划分为若干个时隙。数据流由数据帧 $f_i \in F$ 组成,不同的流具有各自的时隙且只能在对应时隙内传输。作为门控列表核心,时隙规

划 TS 为每个优先级队列分配允许传输的时隙集合。时隙规划按照周期刷新,每个周期的时长为所有流周期的最小公倍数,称为超周期 Hyper。

初始化约束。时隙规划模型的初始时间均为非负值,即端口调度的起始时间 st_{f_i} 、离开时间 dt_{f_i} 等均至少为 0。

$$\forall f_i \in F, \forall i \in Z, 0 < i < len_{f_i} : (st_{f_i} \geq 0) \wedge (dt_{f_i} \geq 0) \quad (1)$$

端到端约束。所有数据流的传输耗时均不得超过预设的最大容许时延 D_{\max} ,在交换机节点帧的离开时间应等于离站时间与端口发送时延之和;帧沿传输路径向后续节点的到达时间则为当前节点出发时刻与端口至目标节点间传播时延之和。

$$\forall f_i \in F, \forall i \in Z, 0 < i < len_{f_i} : (T_i < D_{\max}) \wedge (dt = dt_{v_x, v_y}^{\lceil v_x, v_y \rceil} + D_{\text{send}}^{\lceil v_x, v_y \rceil}) \wedge (at_{v_x, v_y}^{\lceil v_x, v_y \rceil} = st_{v_x, v_y}^{\lceil v_x, v_y \rceil} + D_{\text{tran}}^{\lceil v_x, v_y \rceil}) \quad (2)$$

帧隔离约束。数据帧在流路由路径的首链路传输时,起始时刻不得早于最早允许发送时间,且须在截止日期前于末链路完成传输。这样可以确保不同的流按照各自的时隙传输,避免帧重叠与交叉。

$$\forall f_i \in F, \forall i \in Z, 0 < i < len_{f_i} : (st_{v_x, v_y}^{\lceil v_x, v_y \rceil} > t_0) \wedge (at_{v_x, v_y}^{\lceil v_x, v_y \rceil} < t_{\text{ddl}}) \quad (3)$$

优先级约束。优先级约束是约束设计的核心,每个数据帧所属流有优先级,具体的优先级约束如下。

1)若两帧优先级相同,则时隙规划亦相同。

$$P_{f_a} = P_{f_b} \Rightarrow TS_{f_a} = TS_{f_b} \quad (4)$$

2)当优先级相同的两个帧在同一端口处排队等待发送时,应遵循先进先出原则,前帧发送完毕后,后帧紧随其后。

$$(P_{f_a} = P_{f_b}) \wedge (at_{f_a} < at_{f_b}) \Rightarrow st_{f_a} + D_{\text{end}}^b > st_{f_b} \quad (5)$$

3)若优先级不同,则低优先级流的所有传输必须避开高优先级流的每个时隙。

$$(P_{f_a} > P_{f_b}) \Rightarrow TS_{\text{end}}^{f_a} \leq TS_{\text{start}}^{f_b} \quad (6)$$

3.2 SMT-TAS 机制

SMT-TAS 机制在现有 TAS 门控生成机制基础上,融合 SMT 求解器的逻辑推理与约束求解优势,旨在实现对时间敏感流量的优先级精准调度。该机制的核心思想是将流量调度问题转化为数学约束模型,借助 SMT 求解器寻找满足优先级和时延要求的最优解,以提高网络资源利用效率,从而满足网络环境多样化需求。

SMT-TAS 机制主要包括 4 个模块,各模块的功能如图 5 所示。

1)数据采集模块:负责实时收集网络中的流量数据,包括交换机状态、端口配置、数据流属性等,并通过数据清洗、标准化处理后,为后续模块提供准确的输入信息。

2)约束生成模块:将流量需求和网络拓扑转化为 SMT 求解器可理解的数学约束,确保调度策略能够精准反映优先级、时延等要求。该模块能够根据网络状态动态调整约束条件,以适应复杂多变的网络环境。

3)SMT 求解模块:执行核心调度算法(选用基于优先级的 TSN 调度算法,详见下文),计算出优化优先级调度的最优方案。通过引入并行计算和自适应算法,进一步提升计算效率和调度精度。

4)门控更新模块:将 SMT 求解器输出的调度方案更新至门控列表,实现调度策略的实时部署与执行。该模块还通过同步机制和冗余路径设计,增强系统的稳定性与故障恢复能力。

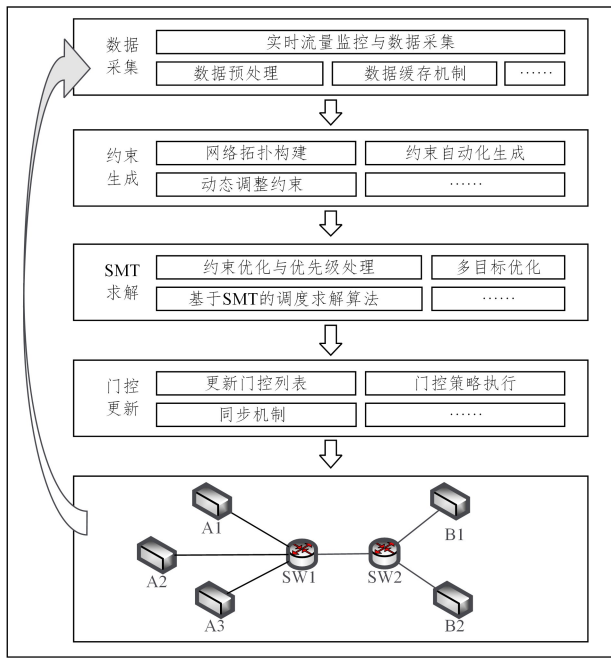


图 5 SMT-TAS 调度机制

Fig. 5 SMT-TAS scheduling mechanism

3.3 基于优先级的 TSN 流量调度算法

为进一步提升优先级流量的调度效率,在 SMT-TAS 调度机制的基础上,提出一种基于优先级的 TSN 流量调度算法。该算法以最大优先级满足率为优化目标,其目标函数如下:

$$Maximize \left(\frac{\sum_{i=1}^N (W_i \times E_i)}{\sum_{i=1}^N W_i} \right) \quad (7)$$

其中, W_i 表示任务 i 的优先级权重,权重大小根据具体业务需求确定; E_i 表示任务 i 的执行状态,取值为 1 表示成功执行,取值为 0 表示未成功执行。算法严格遵守 TSN 中路由和调度约束,在约束条件下寻找近似最优解。

算法的具体流程如图 6 所示。

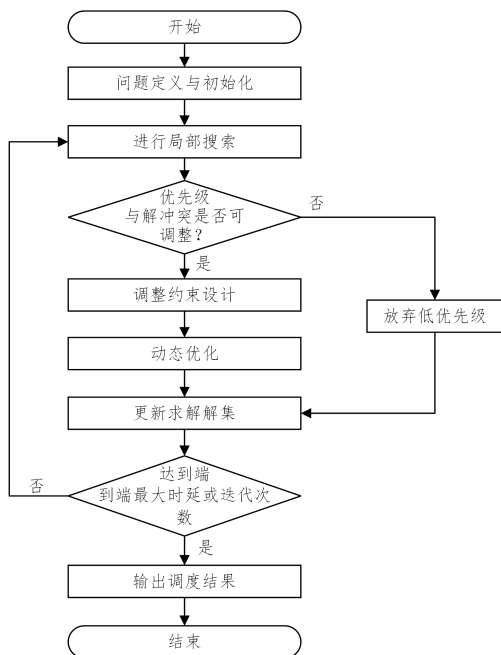


图 6 基于优先级的 TSN 流量调度算法

Fig. 6 Priority-based TSN traffic scheduling algorithm

算法首先定义了调度问题并初始化网络流量需求、拓扑信息以及相关约束条件等。接着,通过局部搜索,从一个随机初始化的解出发,逐步寻找满足约束的解,在此过程中优先处理高优先级流,若遇冲突则舍弃低优先级方案。通过动态优化调整,算法根据优先级满足率的变化,调整搜索方向和步长,若找到新的解能够显著提升优先级满足率,则更新当前最优解,并结合 Dijkstra 算法优化数据流路径,确保优先级满足与负载均衡。当达到预设的最大迭代次数或时间限制时,算法终止并输出优化后的调度结果,同时更新门控生成列表,确保网络流量调度的高效性与稳定性。

4 实验仿真与分析

4.1 仿真设计

仿真实验在 Ubuntu 18.04 Linux 操作系统环境下展开,利用 OMNeT++ 仿真平台、配合 INET 组件与 NeSTiNg 组件构建 TSN 仿真环境。编程语言选用 C++ 和 Python,开发工具使用 Visual Studio Code。此外,实验依托的硬件配置为 Intel Core i5-8300H 处理器(主频 2.30 GHz)以及 8GB 内存。

如图 7 所示,实验环境包括 2 个 TSN 交换机和 5 个端系统。每台交换机均配置 3 个端口,其中部分端口连接终端系统,其余端口用于与其他交换机互联,从而形成具有混合连接特性的网络架构。

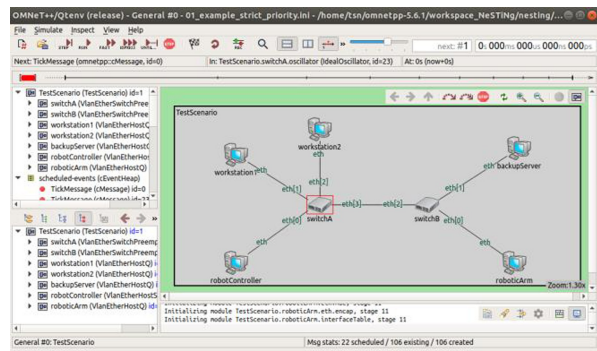


图 7 实验仿真环境

Fig. 7 Experimental simulation environment

仿真过程中,随机生成了不同周期和长度的时间敏感流,具体参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真实验中的流量配置

Table 1 Traffic configuration in simulation experiments

流量类型	优先级	帧长/B	周期/ μ s
TT	7	100	500
SR-A	5 或 6	1000	1000
SR-B	3 或 4	1000	2000
BE	0	100~1500	无

4.2 结果分析

为评估在 TAS 机制中融合 SMT 求解器的优化效果,实验以传统 TAS 算法为对照基准,并采用优先级满足率和端到端时延作为核心评价指标,并对提出的算法稳定性进行评估。

1) 优先级满足率分析

实验选取 30 条至 100 条(步长为 10)不等的时延敏感流作为测试对象,对不同优先级的调度成功率进行验证。仿真结果如图 8 所示,为不同时间敏感流数量下,传统 TAS 与 SMT-TAS 优先级满足率的对比曲线。

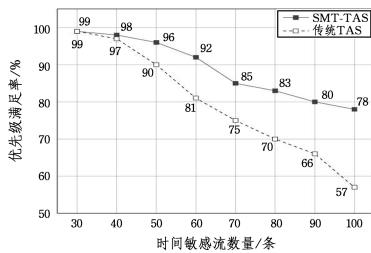


图 8 优先级满足率变化对比曲线

Fig. 8 Comparison curves of priority satisfaction rate

由图 8 可知,随着时间敏感流数量的增加,两种算法的优先级满足率均呈下降趋势,但传统 TAS 的下降速率更快。当调度流数量达到 100 条时,传统 TAS 的优先级满足率比 SMT-TAS 低 23%。这表明,在处理大规模时间敏感流调度任务时,SMT-TAS 保持了较高的优先级满足率,其相较于传统 TAS 的优势也随着任务复杂度的增加而更加显著。

2) 端到端时延分析

时延对照实验中,选取效果更为显著的 10 条至 60 条(步长为 10)时间敏感流进行验证。仿真结果如图 9 所示,为不同时间敏感流数量下传统 TAS 与 SMT-TAS 的端到端时延变化对比曲线。

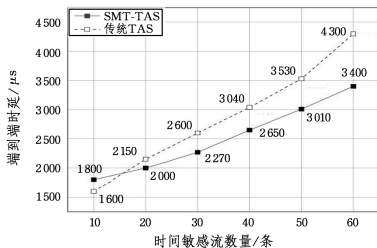


图 9 端到端时延变化对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of end-to-end delay

图 9 所示结果表明,随着时间敏感流数量的增加,两种调度策略的端到端延迟均呈现上升趋势。在初始阶段(调度的时间敏感流数量为 10 时),传统 TAS 略低于 SMT-TAS。但随着调度流数量的增加,传统 TAS 的时延增长速度加快,SMT-TAS 在时延增长方面表现出明显优势。例如,当调度流数量达到 60 条时,SMT-TAS 相比传统 TAS 减少了约 1100 s 的延迟。经分析可知,当调度任务较为简单时,SMT 求解器新增的计算开销导致其初期性能低于传统 TAS 机制。而随着调度复杂度的提升,其通过更高效的资源分配和路径优化,有效控制了延迟增长,展现出更优的调度性能和适应性。

3) 算法稳定性评估

为进一步评估两种算法的稳定性,根据不同调度任务规模分别设置了 10 组重复实验,测试端到端时延。仿真结果如图 10 所示,展示了两种算法的端到端时延标准差对比。

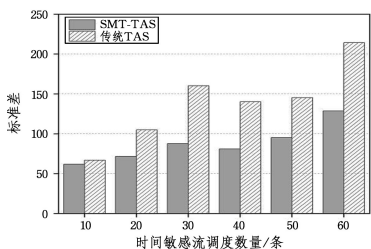


图 10 端到端时延标准差对比

Fig. 10 Comparison of standard deviation of end-to-end delay

由图 10 可知,随着任务规模增加,SMT-TAS 的标准差从 60 左右增长至 130 左右,增幅平缓,显著低于传统 TAS 的标准差。尤其在高负载任务(60 条流)下,传统 TAS 的标准差是 SMT-TAS 的 1.5 倍左右,表现出明显的波动性增加。SMT-TAS 凭借高效的调度策略和资源分配能力,在大规模任务中维持较低波动范围,展现出更优越的稳定性与可靠性。

结束语

本文提出了一种基于可满足性模理论的时间敏感网络流量调度机制,以应对复杂业务中优先级需求带来的挑战。SMT-TAS 机制通过将流量调度问题抽象为数学约束,并在时间感知整形机制中引入 SMT 求解器,动态优化门控生成列表,实现更高效的调度策略。在此基础上,提出了基于优先级的 TSN 流量调度算法,通过最大化优先级满足率来优化调度策略。实验结果表明,与传统 TAS 机制相比,SMT-TAS 机制在优先级满足率和端到端时延方面均表现出显著提升,且在处理相同规模的调度任务时展现了更高的稳定性。

在未来工作中,将深入研究流量调度机制在更复杂网络拓扑和动态流量变化场景下的性能表现,并致力于优化算法以提高求解效率和精度,同时考虑引入更多类型的流量约束和优先级调整策略,以满足实际应用中更加多样化的网络需求。

参考文献

- [1] LIANG X H, HUANG H, ZHANG J, et al. Research and Trend on New Technology of Industrial Network[J]. Communication & Information Technology, 2022(S2): 43-47.
- [2] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications; IEEE Std 802. 1 AS-2020 (Revision of IEEE Std 802. 1 AS-2011)[S]. IEEE, 2020: 1-421.
- [3] WG802. 1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Bridges and Bridged Networks Amendment 25; Enhancements for Scheduled Traffic; IEEE Std 802. 1Qbv-2015 [S]. IEEE, 2016: 1-57.
- [4] WG802. 1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Frame Replication and Elimination for Reliability; IEEE Std 802. 1 CB-2017[S]. IEEE, 2017: 1-102.
- [5] SCHWEISSGUTH E, DANIELIS P, TIMM-ERMANN D, et al. ILP-based joint routing and scheduling for time-triggered networks[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Real-Time Networks and Systems. 2017: 8-17.
- [6] POP P, RAAGAARD M L, CRACIUNAS S S, et al. Design optimisation of cyber-physical distributed systems using IEEE time-sensitive networks[J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2016, 1(1): 86-94.
- [7] OLIVER R S, CRACIUNAS S S, STEINER W, et al. IEEE 802. 1 Qbv gate control list synthesis using array theory encoding [C]//2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2018: 13-24.
- [8] ZHANG Y, XU Q, XU L, et al. Efficient Flow Scheduling for Industrial Time-Sensitive Network: A Divisibility Theory Based Method[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12): 9312-9323.
- [9] NAYAK N G, DURR F, ROTHERMEL K. Incremental Flow Scheduling and Routing in Time-Sensitive Software-Defined Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,

2018, 14(5):2066-2075.

- [10] PANG Z, HUANG X, LI Z, et al. Flow Scheduling for Conflict-Free Network Updates in Time-Sensitive Software-Defined Networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3):1668-1678.
- [11] HELLMANN S D, GLAVACKIJ A, FALK J, et al. Scaling TSN Scheduling for Factory Automation Networks[C]// 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems. 2020:23-30.
- [12] KIM H J, LEE K C, KIM M H, et al. Optimal Scheduling of Time-Sensitive Networks for Automotive Ethernet Based on Genetic Algorithm[J]. *Electronics*, 2022, 11(6):926.
- [13] ZHOU Y, SAMI S, ELES P, et al. Reliability-aware scheduling and routing for messages in time-sensitive networking[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2021, 20(5):1-24.
- [14] PATTI G, BELLO L, LEONARDI L. Deadline-Aware Online Scheduling of TSN Flows for Automotive Applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(4):5774-5784.
- [15] KIM H J, CHOI M H, KIM M H, et al. Development of an Ethernet-Based Heuristic Time-Sensitive Networking Scheduling Algorithm for Real-Time In-Vehicle Data Transmission[J]. *Electronics*, 2021, 10(2):157.
- [16] YAO X, GAN Z, CHEN Y, et al. Hybrid Flow Scheduling with Additional Simple Compensation Mechanisms in Time-Sensitive Networks[C]// 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. 2022:1315-1320.
- [17] WANG S, XU Q, ZHANG Y, et al. Hybrid Traffic Scheduling Based on Adaptive Time Slot Slicing in Time-Sensitive Networking[C]// 2022 IEEE International Conference on Industrial Technology. 2022:1-7.
- [18] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Performance Comparison of IEEE 802.1 TSN Time Aware Shaper (TAS) and Asynchronous Traffic Shaper (ATS) [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:44165-44181.
- [19] TANG A, WANG X F, HE F. A survey of satisfiability modulo theories[J]. *Computer Engineering & Science*, 2024, 46(3):400-415.



XU Jing, born in 1983, Ph.D. Her main research interests include cybersecurity, traffic scheduling monitoring and artificial intelligence.



LIU Chunlong, born in 2000, postgraduate. His main research interests include time-sensitive networking and next generation Internet.