

结合 SDN 控制器的 TSN 周期性带宽预留值计算方法

苏建忠¹, 张华宇¹, 朱海龙^{1,2}

(1. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111; 2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要:近年来,随着 TSN 技术的发展,其低时延、低抖动、最大时延可预测的优势可以很好地应用于自动驾驶技术以及工业互联网。针对 TSN 协议中带宽预留技术预留至多 75% (经验值) 带宽的问题,同时结合 SDN 的数据面和控制面的分离技术,提出一种结合 TSN-SDN 控制器,在控制器层面规划整个拓扑的预留计划和路径的预留方案。该方案同时提供 2 种计算具体预留带宽值的方法,计算方法在每一跳按照时隙预留相应的带宽值。仿真环境实验结果表明,在达到时延要求的基础之上,很好地控制抖动为 0,同时还可以分时隙利用带宽,为多条流同时保障带宽利用率。

关键词:时间敏感网络;确定性网络;带宽预留;软件自定义控制器

中图分类号: TP393

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021204

Computing method for periodic stream reservation in TSN combined with SDN controller

SU Jianzhong¹, ZHANG Huayu¹, ZHU Hailong^{1,2}

1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In recent years, with the development of TSN, its low latency, low jitter and predictable maximum delay can be widely used in automatic driving technology and industrial Internet. To solve the 75% (empirical value) bandwidth problem of stream reservation technology in TSN protocols, and combine with the separation of data plane and control plane in SDN, a stream reservation solution was put forward, which was combined with TSN-SDN controller and scheduling the transmission path and reservation of the entire topology in the control plane. And two reservation computing methods was put forward, which would give out a bandwidth with time slot. The simulation experimental results show that it can control the jitter to 0 based on require latency, and also use the bandwidth based on time slot to guarantee the utilization of bandwidth.

Keywords: time sensitive networking, deterministic network, stream reservation, SDN controller

1 引言

在传统以太网中,尽力而为的体系架构已经运行多年,短视频等移动网络数据流量的激烈增长,将带来大量的瞬时拥堵和数据时延增大。同时,更多的精细类网络应用,例如车载网络、工业控制命令、5G 远程操作等^[1-2],需要更低的端

到端时延以及极低的时延抖动,但是传统网络目前无法提供保障。目前,由电气和电子工程师协会和互联网工程任务组提出的确定性网络技术^[3]成为当前较成熟的实现局部确定性、保障时延和带宽的网络技术,通过一系列网络协议(IEEE 802.1AS 时钟同步^[4]、IEEE 802.1QBV 流量调度^[5]、IEEE 802.1Qcc 资源配置管理^[6]等)实现确定时

收稿日期: 2021-07-11; 修回日期: 2021-10-11

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1805300)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1805300)

延, 其中 IEEE 802.1Qcc 资源配置管理是整合 TSN, 包括带宽预留规划, 通过集中式控制规划与调度网络流量以满足确定性时延和抖动。同样, SDN 架构将控制面与数据面分离^[7-9], 通过软件灵活、合理地解决不同硬件的部署问题, 提高网络利用率, 因此引入基于 SDN 的 TSN 架构, 通过 SDN 集中式控制规划和调度流量, 能够有效地支持确定性时延和抖动。

当前 TSN 协议中与带宽预留相关的主要是 IEEE 802.1Qat 以及 IEEE Qcc 协议, IEEE 802.1Qat 包含带宽预留协商确定过程, 阐述从发出预留消息到接收者的详细过程。同时在 IEEE 802.1Qat (一种分布式方式的网络需求与资源分配机制) 基础之上, IEEE 802.1Qcc 支持集中式的注册与流预留服务, 称为 SRP 增强模式。在这种模式下, 系统通过降低预留消息的大小与频率 (放宽计时器), 以便在链路状态和预留变更时触发更新。IEEE 802.1Qcc 提供了一套工具, 用于全局管理和控制网络, 通过网络集中控制器 (CNC, central network controller) 等交互以提供运行资源的预留、调度以及其他类型的远程管理协议, 如 NETCONF 或 RESTCONF, 同时与 IETF YANG/NETCONF 数据建模语言兼容。而带宽预留技术在无线通信领域已经有所应用, 其根据接入 QoS 需求可以实现时分多址等技术。当前研究内容更多关注带宽调度, 包括路径规划、最大化总带宽、最早完成时间和最短持续时间调度等研究方向^[10-13]。

但是目前协议标准以及研究论文中没有明确指出带宽预留值计算方法, 无法给出需要预留的准确带宽值, 多数采用经验值, 同时预留的带宽值始终占用或持续一段时间占用, 在周期性网络中可能导致此部分的带宽通道浪费, 而且复杂的预留确定过程在确定性网络中实时性无法得到保障。

在此基础上, 本文提出结合 SDN 控制器在控制面的整体流量以及转发路径的规划能力^[14], 通过控制器下发更新配置实现动态预留^[15]和按时隙流预留的方式, 在控制器端配置终端设备的流量参数 (包括流量发送周期大小等流量模型参数), 控制器整体调度规划网络数据流量转发路径等, 结合高精度时钟同步, 计算出高精度周期性分时隙预留带宽预留值, 再通过控制器下发至交换设备执行。首先

通过分解目标时延到每一跳链路中, 根据时延计算数据流通过链路需要的带宽值; 然后结合相应时隙内其他预留值计算总预留值确认是否预留成功, 保障目标数据流的传输带宽, 同时提高带宽的利用率; 最后在非使用时隙将带宽留给其他数据流使用, 保障 BE 流的传输。本文方法首先保障低时延、可控抖动, 然后及时释放带宽提升带宽利用率, 同时结合 IEEE 802.1Qcc 网络配置模式, 满足终端节点和数据流量的不同变化。

2 建立网络流量模型

本文通过周期性预留带宽, 同时结合控制器来解决 TSN 协议缺少带宽预留值计算的问题, 通过对链路规划计算在指定时隙内预留特定的带宽值, 在保障传输时延的基础上减小抖动, 同时可以有效地提高带宽利用率。该方法首先确定预留执行周期, 然后在周期内计算传输路径中每一跳需要的传输时隙以及带宽值, 确定该时隙内是否有足够的带宽值可以预留, 再确定传输路径中每一跳的预留时隙以及预留值, 最后得到整个周期内的预留方案。TSN 交换设备周期性执行配置方案。

针对不同网络拓扑, 本文给出 2 种时延分配。

1) 根据计算等式, 本文将总的要求时延按照链路带宽比平均分配到每一跳链路, 确定每一跳的时延后即可计算出对应的带宽预留值; 2) 结合可满足性模理论 (SMT, satisfy module theory) (SMT 通过建立约束条件得到一系列一阶逻辑等式, 在满足等式的基础上得到一组未知数的解, 可通过现有求解器求出) 问题原理, 建立约束条件模型, 利用 Z3 求解器求得一组合适解。具体的求解场景见第 3 节。

2.1 均分

带宽预留值的计算需要先确定每一跳链路的时延, 因此本节将数据流的要求时延分配到每一跳中, 采用的分配策略为除去第一跳所耗时延外, 其他跳占用时延根据其链路带宽与传输路径链路带宽之和的占比来分配。

网络拓扑示例如图 1 所示, 包含 6 个 TSN 节点, 节点 a 与交换机 sw_1 链路带宽为 100 Mbit/s, 链路传输时延为 30 ns; 其他链路带宽为 1 Gbit/s, 链路传输时延为 10 ns; 设备处理时延为 100 ns; 设备 TSN 拓扑中源节点 a 、目的节点 c 的流量发出时间为 0, 大小为 1 200 B, 周期为 310 μ s, 时延要求为

160 μs ；源节点 b 、目的节点 d 的流量发出时间为 0，大小为 2 000 B，周期为 310 μs ，时延要求为 200 μs 。

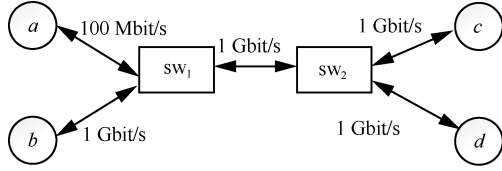


图 1 网络拓扑示例

根据模型以及路径规划， a 到 c 的流量中，链路 $[a, \text{sw}_1]$ 带宽全占用，需要耗时 98 350 ns ($1\ 229\ \text{B} \div 100\ \text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1} + 30\ \text{ns}$)，去除设备 sw_1 与 sw_2 耗时 200 ns 之后剩余时延 61 450 ns，链路 $[\text{sw}_1, \text{sw}_2]$ 和链路 $[\text{sw}_2, c]$ 带宽值相等且总带宽值为 2 Gbit/s，因此链路 $[\text{sw}_1, \text{sw}_2]$ 与链路 $[\text{sw}_2, c]$ 分配时延均为 30 725 ns。

同理，可求得 b 到 d 流量的时延分配。

2.2 SMT 建模

本节结合 SMT 问题原理^[16]，建立约束条件模型，利用 Z3 求解器^[17]求得时延分配以及带宽预留值的一组合适解，为了建立整体约束条件，首先介绍网络拓扑中基础变量以及下文需要使用的其他变量的定义，如表 1 所示。

结合 SMT 问题原理，本文算法将通过用户约束、链路约束、以太网基础约束和算法约束 4 个方面建立约束条件。

1) 用户约束。用户约束主要包括数据流开始发送时间、数据大小、数据流周期、数据流总体要求时延等约束。数据报文在网络中的总体要求时延分为链路信道时延、设备处理时延和数据传输时延，计算式为

$$\sum \theta^{[V_a, V_b]} + \sum \varrho_a + \sum \mu^{[V_a, V_b]} = \beta \quad (1)$$

2) 链路约束。相同时隙内所有预留值之和小于链路总带宽值，单个预留值小于链路带宽的 50%（经验值，避免不同跳之间预留带宽值相差过大），保证带宽预留值不超出真实物理带宽值，计算式为

$$\sum \omega_{[b, e], i}^{[V_a, V_b]} < \varepsilon^{[V_a, V_b]}, \forall \omega_{[b, e], i}^{[V_a, V_b]} < 0.5 \varepsilon^{[V_a, V_b]} \quad (2)$$

3) 以太网基础约束。该约束遵循以太网报文传输基本准则，包括 3 个方面：流量整体时延为最后一位数据传完的时延；后帧的发送需要在前一帧结束后；除第一帧报文不需要等待外，其他报文都需要等待前一帧传输结束。最后一帧时延为数据流的

整体时延，即 $\rho^{[V_a, V_b]} = \beta^{[V_a, V_b]}$ ；发送设备的最后一帧数据的发出时间等于前一帧数据的结束时间，即 $\sigma_0^{[V_a, V_b]} + \theta^{[V_a, V_b]} + \alpha_0^{[V_a, V_b]} / \omega_0^{[V_a, V_b]} = \sigma_1^{[V_a, V_b]}$ ；第一帧传输时不需要等待，因此后一跳的发出时间等于前一跳的结束时间 + 设备时延，即 $\sigma_0^{[V_a, V_b]} + \theta^{[V_a, V_b]} + \alpha_0^{[V_a, V_b]} / \omega_0^{[V_a, V_b]} + \varrho_a = \sigma_0^{[V_a, V_c]}$ 。

表 1 系统参数或公式

参数或公式	含义
$G(V, E)$	网络拓扑中节点和链路集合
V	网络节点（终端、TSN talker、TSN listener、交换机等）
E	终端节点之间的连接链路（连接物理线路，如光纤、双绞线等）
$F^{[V_a, V_b]}, \forall f_i^{[V_a, V_b]} \in F^{[V_a, V_b]}$	节点 a 到 b 的帧流量
$\alpha_i^{[V_a, V_b]} / B$	节点 a 到 b 的流量切分后对应第 i 帧大小
T/s	周期
β / s	流量的最大时延要求
$\beta^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 的整体时延
γ	数据流切分的帧数
δ / B	流量的最后一帧大小
$\varepsilon^{[V_a, V_b]} / (\text{bit}\cdot\text{s}^{-1})$	节点 a 到 b 的链路总带宽值
$\omega_{[b, e], i}^{[V_a, V_b]} / (\text{bit}\cdot\text{s}^{-1})$	节点 a 到 b 的链路时隙预留带宽值， c 和 e 表示周期内起始时间， j 表示流量特征用于标识具体的一条流
$[c, e] \in T, i \in F$	
$\theta^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 信道时延
ϱ_a / s	节点 a 设备时延
$\mu^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 流的链路传输时延
$\rho^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 流的最后一帧链路传输时延
$\sigma_i^{[V_a, V_b]} / s$	流的第 i 帧在节点 a 到 b 的发出时间
$\tau^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 第一帧数据包到达时间
$\varphi^{[V_a, V_b]} / s$	节点 a 到 b 最后一帧数据包到达时间

4) 算法约束。传输过程中单帧与多帧存在差异，主要表现为多帧中后帧存在排队等待情况，因此需要进行差异对待。满足 3.1 节和 3.2 节计算方法，即当 $\gamma=1$ 时，存在约束式

$$\mu^{[V_a, V_b]} = \frac{\alpha^{[V_a, V_b]}}{\omega^{[V_a, V_b]}} \quad (3)$$

当 $\gamma > 1$ 时，存在以下 3 种约束情况，满足一种即可。

$$\theta^{[V_a, V_b]} + \frac{\delta}{\omega^{[V_a, V_b]}} = \mu^{[V_a, V_b]} + \theta^{[V_a, V_b]}$$

$$\omega^{[V_a, V_b]} \geq \omega^{[V_{a-1}, V_a]} \frac{1\ 529\ \text{B}}{\delta} \quad (4)$$

$$\theta^{[V_a, V_b]} + \frac{\delta + 1529 B}{\omega^{[V_a, V_b]}} - \theta^{[V_{a-1}, V_a]} - \frac{\delta}{\omega^{[V_{a-1}, V_a]}} = \mu^{[V_a, V_b]} + \theta^{[V_a, V_b]}, \omega^{[V_a, V_b]} \geq \omega^{[V_{a-1}, V_a]} \frac{1529 B}{\delta} \quad (5)$$

$$\gamma \theta^{[V_a, V_b]} + (\gamma - 1) \frac{1529 B}{\omega^{[V_a, V_b]}} + \frac{\delta}{\omega^{[V_a, V_b]}} - (\gamma - 1) \theta^{[V_{a-1}, V_a]} + \frac{(\gamma - 2) 1529 B + \delta}{\omega^{[V_{a-1}, V_a]}} = \mu^{[V_a, V_b]} + \theta^{[V_a, V_b]}, \omega^{[V_a, V_b]} < \omega^{[V_{a-1}, V_a]} \quad (6)$$

通过建立以上约束条件模型，再通过 Z3 求解器计算，即可求解出每一跳链路的预留带宽值以及传输时延，在此基础上也可得出对应链路的占用时隙，即可得到完整的带宽预留配置文件。

3 几种典型场景分析

TSN 带宽预留主要分为 2 种类型流量：单帧流量，即数据流小于 1 500 B 的流量（MTU 大小）；多帧流量，即数据流大于 1 500 B 需要切分为多帧的流。本节针对以上 2 种类型流量的带宽预留值计算方法进行阐述。

3.1 单帧预留

单帧数据流量带宽预留将数据流映射到对应的周期时间轴中，数据帧在每一跳的传输时延确定之后就能确定其所需的预留带宽值以及对应预留时隙，假设帧到达当前链路 $[V_a, V_b]$ 时间为 t_0 时刻，此时可推出帧在下一跳链路的发出时间为 $t_0 + \theta^{[V_a, V_b]} + \mu^{[V_a, V_b]} + \varrho_{V_b}$ ，依次类推，可以计算出数据帧在每一跳链路所耗费的时间，同时满足传输耗时等式和时延要求等式

$$\mu^{[V_a, V_b]} = \frac{f}{\omega^{[V_a, V_b]}} \quad (7)$$

$$\beta = \sum_0^V (\theta^{[V_a, V_b]} + \mu^{[V_a, V_b]} + \varrho_{V_b})$$

其中， μ 和 ω 为未知解，其他为已知值。因此只需要求解出其中一个，另一个值即可得出，同时还需要满足对应时隙的预留值之和小于对应链路总带宽值，即 $\sum_0^V \omega^{[V_a, V_b]} < \varepsilon$ 。通过以上求解可以得出，

链路 $[V_a, V_b]$ 在时隙 $[t_0, t_0 + \theta^{[V_a, V_b]} + \mu^{[V_a, V_b]})$ 内需要预留的带宽值为 $\omega^{[V_a, V_b]}$ 。

3.2 多帧预留

不同于单帧的情况，多帧带宽预留主要面临前后带宽不一致问题（多帧：当需要发生的数据流大

于 MTU 时，需要将数据流切分为多个小于 MTU 的数据帧发送，并且除最后一帧外按最大帧切分，其发送开始时间相同），可分为两类：1)假设当前预留值大于或等于前一跳，此时当前交换机不会出现数据包排队等待情况，即前一跳发完一帧，当前马上可以转发并且在下一帧到来之前发完，此时要求的时延就是最后一帧数据流产生的时延；2)假设当前预留值比前一跳小，此时当前交换机出现数据包排队等待情况，即当前交换机数据帧转发还未完成时，下一帧数据包已经到来，这样最后一帧数据包到来之后还需要产生等待前一跳时延，此时要求的时延为最后一帧的发送时延加上等待时延。

为了解决上述两类问题，本文提出以下 3 种假设。

1)假设预留带宽小于前一跳带宽值，此时链路的时延为整体数据在当前链路 $[V_a, V_b]$ 的传输时延减去最后一帧的到达时间，即

$$\tau^{[V_a, V_b]} + \frac{F}{\omega^{[V_a, V_b]}} + \gamma \theta^{[V_a, V_b]} - \phi^{[V_a, V_b]} = \beta^{[V_a, V_b]} \quad (8)$$

2) 假设预留带宽大于或等于前一跳 $[V_a, V_b]$ 带宽值，同时小于前一跳带宽值的 $1529 B/\delta$ 倍（1529 B 为传输的最大帧长度），此时最后一帧前面的数据包传输不产生等待时延，只有最后一帧数据包需要等待，因此要求当前链路 $[V_b, V_c]$ 产生的时延等于最后一帧数据包的等待时延加上最后一帧数据包的传输时延，即

$$\frac{1529 B}{\omega^{[V_b, V_c]}} + \theta^{[V_b, V_c]} - \frac{\delta}{\omega^{[V_a, V_b]}} - \theta^{[V_a, V_b]} + \frac{\delta}{\omega^{[V_b, V_c]}} + \theta^{[V_b, V_c]} = \beta^{[V_b, V_c]} \quad (9)$$

3) 假设预留带宽值大于或等于前一跳带宽值的 $1529 B/\delta$ 倍，此种情况最简单，上一跳转发的数据包会被及时转发完，数据包的传输不产生等待时延，因此当前链路 $[V_a, V_b]$ 要求时延即为最后一帧的传输时延，即

$$\frac{\delta}{\omega^{[V_a, V_b]}} + \theta^{[V_a, V_b]} = \beta^{[V_a, V_b]} \quad (10)$$

通过以上 3 种方式，可分别计算出对应链路的预留带宽值。首先与各自的假设条件对比，符合假设条件的预留值为合适的预留值；然后根据预留值计算出对应链路的通过时隙；最后校验每一跳链路对应时隙的总预留值是否小于总带宽值。由于在计算过程中存在精度取舍问题，导致多帧预留后的计

算时延与要求时延会出现偏差，使最后结果小于或等于要求时延。

3.3 多流预留

当需要多条流预留时，需要遍历每一条流，根据流量的优先级优先预留，针对优先级高的流量，当数据流量为单帧时，使用 3.1 节单帧预留方法处理；当数据流量为多帧时，使用 3.2 节多帧预留方法处理。结合整个拓扑和流量优先级，在计算路由的基础上预留带宽，同时结合最短路径原则确定路由，具体流程如下。

1) SDN 控制器中确定网络拓扑参数，包括设备信息、信道信息、连接信息、流量信息（含时延要求、优先级、是否需要预留）、确定各流量的超周期（各条流的周期最小公倍数）。

2) 将流量信息按照是否需要预留以及优先级排序。

3) 按顺序循环处理每一条流。

3.1) 判断是否已经生成路由，如果没有生成则先生成路由，选取最短路径的一条，计算预留；

3.2) 如果已经生成，直接计算预留；

3.3) 要求时延按照一定规则（第 3 节中介绍）分配到每一跳上，计算的原则为发送端全部占用，其他链路按照规则预留；

3.4) 预留成功后将对应时隙的预留带宽值从链路中扣除；

3.5) 生成路由表配置信息。

4) 将剩余带宽配置给不需要预留的流量。

5) 将路由和预留配置通过 SDN 控制器下发至

交换设备执行。

4 实验分析

为了验证算法的有效性，本文在 OMNeT++ 仿真平台环境中对几组代表性数据进行实验，运行环境为 8 核 32 G 处理器、ubuntu18 系统、OMNeT++5.4.1 版本。本节主要包括网络拓扑等相关参数介绍和实验结果分析 2 个部分。

4.1 实验参数介绍

4.1.1 网络拓扑

实验采用的网络拓扑如图 2 所示，模拟了 7 个交换机、2 个高清摄像头、2 个环视摄像头、5 个激光雷达、2 个毫米波雷达和 2 个超声波雷达信号的数据发送量和发送周期，终端设备按照各自周期以及流量大小向设备 DomainControllor 发送报文。同时，拓扑之外有一台 SDN 控制器，但其不在 OMNeT++ 拓扑中展现，因为本文通过 SDN 控制器配置了网络拓扑和流量，并计算出具体预留值以及时隙，通过配置文件的形式加载到 OMNeT++ 实验中，所以控制器没有在拓扑中体现，属于独立模块可单独使用。

4.1.2 网络参数表

设备流量参数如表 2 所示。由表 2 可知，高清摄像头每 33 ms 开始产生 26.5 MB 的数据，需要 17 667 帧切片发送（最大帧为 1 500 B）；环视摄像头每 40 ms 产生 5 MB 数据，需要切片 3 334 帧发送；激光雷达每 300 μ s 产生 1 200 KB 数据，只需要 1 帧；毫米波雷达每 50 ms 产生 100 KB 数据，需要切片为 67 帧发

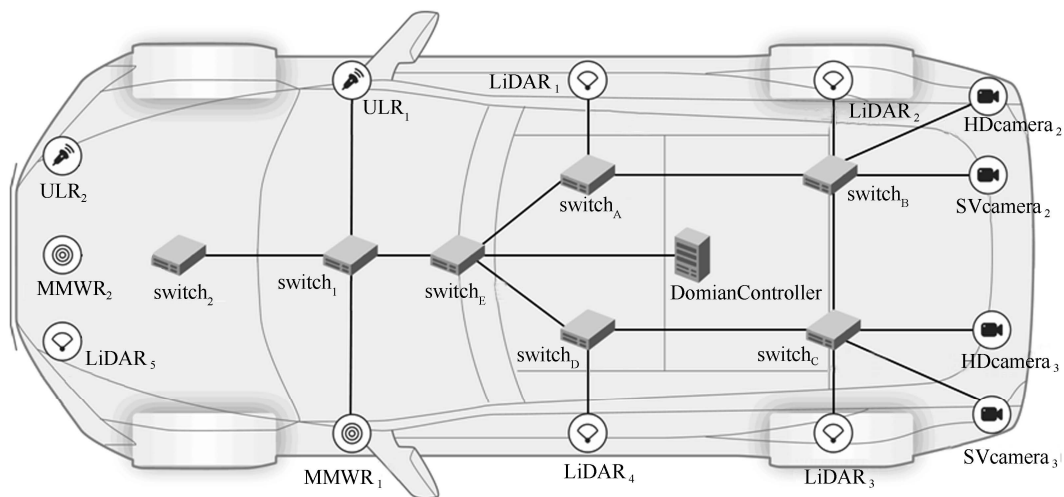


图 2 实验网络拓扑

送; 超声波雷达每 1 ms 产生 500 B 数据, 只需要 1 帧。

表 2 设备参数

名称	设备用例	周期	数据大小
LiDAR ₁ ~LiDAR ₅	激光雷达	300 μs	1 200 KB
MMWR ₁ ~MMWR ₂	毫米波雷达	50 ms	100 KB
ULR ₁ ~ULR ₂	超声波雷达	1 ms	500 B
HDcamera ₁ ~HDcamera ₄	高清摄像头	33 ms	26.5 MB
SVcamera ₁ ~SVcamera ₄	环视摄像头	40 ms	5 MB

4.1.3 链路参数

对应网络拓扑, 选择设备之间的连接参数, 具体如下。

switch_A~switch_E之间采用 40 Gbit/s、10 ns 时延连接; 接收端 DomainController 采用 40 Gbit/s、10 ns 时延连接 switch_E; 高清摄像头采用 10 Gbit/s、10 ns 时延连接 switch_E; 环视摄像头采用 10 Gbit/s、10 ns 时延连接; 雷达等其他设备采用 100 Mbit/s、30 ns 时延连接。

4.2 实验结果分析

按照场景的不同, 本节实验分为 6 组, 分别验证单帧、多帧以及两者相结合的场景下, 通过均分和 SMT 方法的不同计算方式产生的时延和抖动效果, 以下实验单帧均选取设备 LiDAR₂ 数据流、多帧均选取设备 SVcamera₂ 数据流验证, 数据流周期大小等参数见 4.1.2 节, 设备 LiDAR₂ 数据流时延要求为 120 μs, 设备 SVcamera₂ 数据流时延要求为 5 ms, 设备 SVcamera₂ 数据流优先级高于设备 LiDAR₂ 数据流, 实验数据中使用时延标准偏差表示实验抖动, 单位均为 s。

4.2.1 单帧周期性预留-均分

本节针对设备 LiDAR₂ 单帧数据流周期性预留带宽, 预留值计算方式采用均分方法, 部分结果如表 3 所示。

表 3 实验结果 (单帧周期性预留-均分)

设备名称	平均时延/s	时延标准偏差/s
LiDAR ₁	9.989 96×10 ⁻⁵	3.255×10 ⁻⁶
LiDAR ₂	0.000 12	0
LiDAR ₃	0.000 100 608	3.3395 3×10 ⁻⁶
SVcamera ₂	0.004 124 02	1.229 71×10 ⁻⁵
SVcamera ₃	0.004 123 94	1.229 74×10 ⁻⁵
HDcamera ₂	0.021 785 3	4.659 28×10 ⁻⁶
HDcamera ₃	0.021 785 1	4.666 54×10 ⁻⁶

实验结果表明, 均分方法可以有效地求解周期性单帧预留带宽值, LiDAR₂ 设备时延稳定在 120 μs, 达到实验预期目的, 同时其他背景流也全部发送和接收完毕, 部分预留时隙带宽利用率达 100%。

4.2.2 单帧周期性预留-SMT

本节针对设备 LiDAR₂ 单帧数据流周期性预留带宽, 预留值计算方式采用 SMT 方法, 结果如表 4 所示。

表 4 实验结果 (单帧周期性预留-SMT)

设备名称	平均时延/s	时延标准偏差/s
LiDAR ₁	9.991 39×10 ⁻⁵	3.301 65×10 ⁻⁶
LiDAR ₂	0.000 120 002	0
LiDAR ₃	0.000 100 623	3.382 04×10 ⁻⁶
SVcamera ₂	0.004 123 87	1.234 82×10 ⁻⁵
SVcamera ₃	0.004 123 72	1.235 6×10 ⁻⁵
HDcamera ₂	0.021 785 5	4.696 8×10 ⁻⁶
HDcamera ₃	0.021 785 3	4.640 21×10 ⁻⁶

实验结果表明, SMT 方法可以有效地求解单帧周期性预留带宽值, 实验中 LiDAR₂ 设备时延稳定在 120 μs, 达到实验预期目的, 同时其他背景流也全部发送和接收完毕, 时延比预期多 2 ns, 这是由于计算精度取舍导致的。同时满足本文 2.2 节中采用的 4 个约束条件, 总体时延不超出 120 μs, 预留带宽值不超出链路实际带宽 (本节实验链路[交换机 B, 交换机 A]预留值为 19 Gbit/s 左右, 实际带宽为 40 Gbit/s), 单帧传输无等待时延, 符合 3.1 节预留方式。

4.2.3 多帧周期性预留-均分

本节针对设备 SVcamera₂ 多帧数据流周期性预留带宽, 预留值计算方式采用均分方法, 结果如表 5 所示。

表 5 实验结果 (多帧周期性预留-均分)

设备名称	平均时延/s	时延标准偏差/s
LiDAR ₁	9.949 87×10 ⁻⁵	2.055 74×10 ⁻⁷
LiDAR ₂	0.000 100 445	3.402 17×10 ⁻⁷
LiDAR ₃	0.000 100 05	4.684 53×10 ⁻⁷
SVcamera ₂	0.004 970 96	0
SVcamera ₃	0.004 111 48	4.556 79×10 ⁻⁷
HDcamera ₂	0.021 784 2	8.499 88×10 ⁻⁸
HDcamera ₃	0.021 784 1	2.386 02×10 ⁻⁷

实验结果表明，均分方法可以很好地求解多帧周期性预留问题，其中 SVcamera₂ 设备时延稳定在 4.97 ms，低于目标值 5 ms，达到实验预期目的，同时其他背景流也全部发送和接收完毕。

4.2.4 多帧周期性预留-SMT

本节针对设备 SVcamera₂ 多帧数据流周期性预留带宽，预留值计算方式采用 SMT 方法，结果如表 6 所示。

表 6 实验结果（多帧周期性预留-SMT）

设备名称	平均时延	时延标准偏差
LiDAR ₁	0.000 105 487	$2.444\ 96 \times 10^{-5}$
LiDAR ₂	0.000 106 44	$2.457\ 46 \times 10^{-5}$
LiDAR ₃	0.000 106 036	$2.459\ 97 \times 10^{-5}$
SVcamera ₂	0.004 980 336	0
SVcamera ₃	0.004 210 84	$7.756\ 47 \times 10^{-5}$
HDcamera ₂	0.021 793 2	$3.192\ 85 \times 10^{-5}$
HDcamera ₃	0.021 793 1	$3.206\ 59 \times 10^{-5}$

实验结果表明，SMT 方法可以很好地求解多帧周期性预留问题，其中 SVcamera₂ 设备时延稳定在 4.98 ms，低于时延要求 5 ms，达到实验预期目的，同时其他背景流也全部发送和接收完毕。但是相比 4.2.3 节，背景流的整体时延和抖动均有所增加，抖动增长 2 个数量级。本节挑选设备 LiDAR₁ 和设备 SVcamera₃ 两组数据进行对比，图 3 为 LiDAR₁ 设备的时延对比，均分方法的时延抖动小于 SMT 方法的时延抖动；图 4 为 SVcamera₃ 设备的时延对比，同样，SMT 方法时延抖动均高于 4.2.3 节的均分方法。通过两组对比图也可以看出，均分方法对其他背景流的影响更小，其他数据流的时延和抖动更低，同时满足 2.2 节中采用的 4 个约束条件，总体时延不超出 5 ms，预留带宽值不超出链路实际带宽（本节实验链路[switch_B, switch_A]预留值约为 8 Gbit/s，实际带宽为 40 Gbit/s），本节属于多帧预留，因此采用最后一帧的时延作为整体流时延，符合 3.2 节多帧预留方式，其中在交换机 B 前后段存在前后带宽不一致情况（链路[SVcamera₂, switch_B]带宽为 10 Gbit/s，链路[switch_B, switch_A]预留值为 8 Gbit/s）。

4.2.5 单帧多帧结合周期性预留-均分

本节针对设备 LiDAR₂ 单帧数据流和设备 SVcamera₂ 多帧数据流周期性预留带宽，预留值计算方式采用 SMT 方法，结果如表 7 所示。

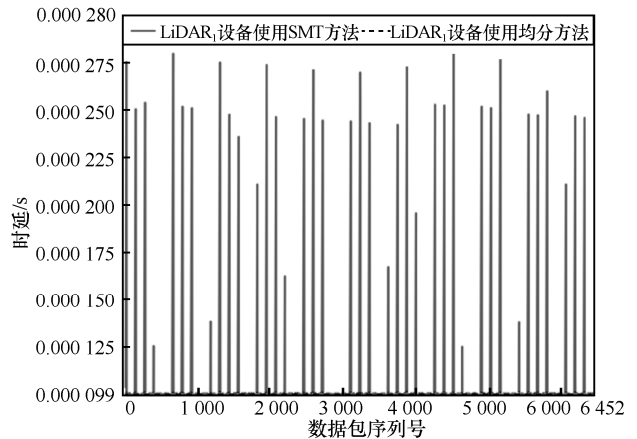


图 3 LiDAR₁ 设备的时延对比

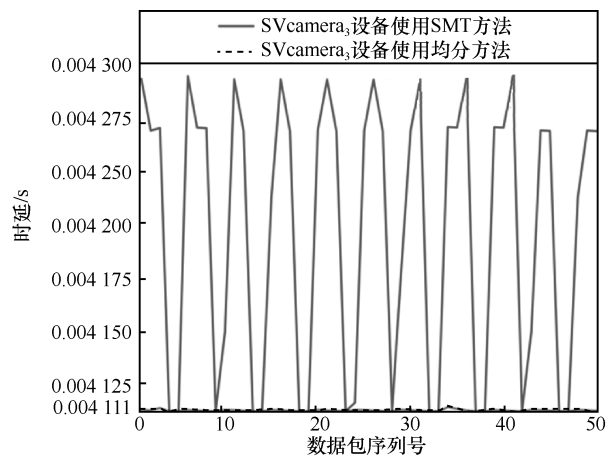


图 4 SVcamera₃ 设备的时延对比

表 7 实验结果（单帧多帧结合周期性预留-均分）

设备名称	平均时延/s	时延标准偏差/s
LiDAR ₁	$9.928\ 41 \times 10^{-5}$	$3.259\ 73 \times 10^{-7}$
LiDAR ₂	0.000 12	0
LiDAR ₃	$9.998\ 88 \times 10^{-5}$	$4.574\ 37 \times 10^{-7}$
SVcamera ₂	0.004 970 96	0
SVcamera ₃	0.004 111 53	$4.284\ 32 \times 10^{-7}$
HDcamera ₂	0.021 7842	$9.825\ 51 \times 10^{-8}$
HDcamera ₃	0.021 784	$2.546\ 38 \times 10^{-7}$

实验结果表明，均分方法可以很好地求解单帧多帧结合的周期性预留问题，其中 SVcamera₂ 设备时延稳定在 4.97 ms，低于目标值 5 ms，LiDAR₂ 设备时延稳定在 120 μs，达到实验预期目的，同时其他背景流也全部发送和接收完毕。

4.2.6 单帧多帧结合周期性预留-SMT

本节针对设备 LiDAR₂ 单帧数据流和设备 SVcamera₂ 多帧数据流周期性预留带宽，预留值计算方式采用 SMT 方法，结果如表 8 所示。

表 8 实验结果 (单帧多帧结合周期性预留-SMT)

设备名称	平均时延/s	时延标准偏差/s
LiDAR ₁	0.000 117 749	$9.374 54 \times 10^{-5}$
LiDAR ₂	0.000 120 003	0
LiDAR ₃	0.000 118 456	$9.377 93 \times 10^{-5}$
SVcamera ₂	0.004 980 1	$3.548 23 \times 10^{-7}$
SVcamera ₃	0.004 371 43	0.000 343 429
HDcamera ₂	0.021 808 5	$9.444 48 \times 10^{-5}$
HDcamera ₃	0.021 808 4	$9.451 45 \times 10^{-5}$

LiDAR₂ 设备时延稳定在 120 μs, SVcamera₂ 设备的平均时延为 4.98 ms, 抖动为 0.000 35 ms, 同时其他背景流也全部发送和接收完毕。结合图 5 可以发现, 在超周期 (各条流的周期最小公倍数) 内, 出现两次 4.980 336 ms 时延、一次 4.979 583 ms 规律性时延。查看预留配置发现, SMT 算法产生的结果为相同规律的预留值, 因此也符合实验预期。同样, 如图 6 和图 7 所示, 均分方法相比 SMT 方法数据流产生的时延和抖动更低。

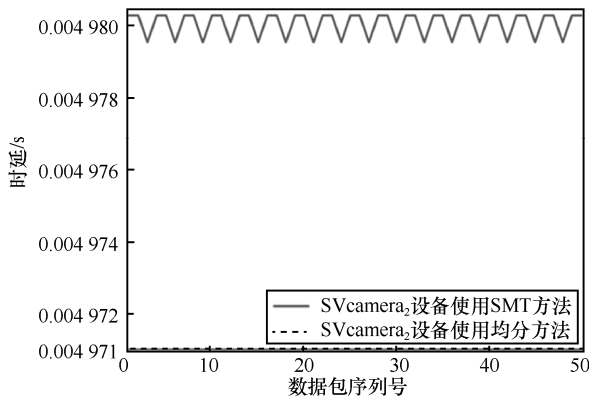


图 5 SVcamera₂ 设备的时延对比

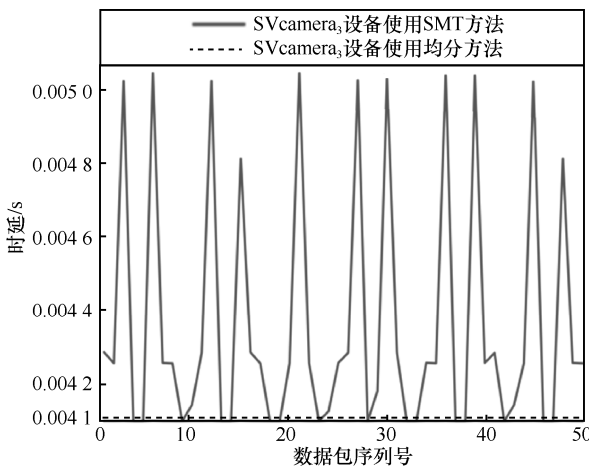


图 6 SVcamera₃ 设备的时延对比

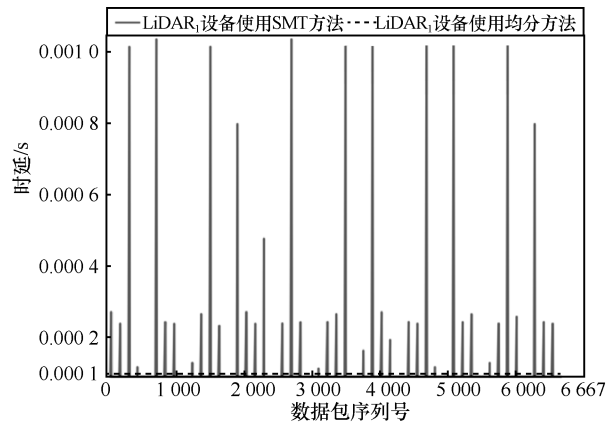


图 7 LiDAR₁ 设备的时延对比

5 结束语

通过以上对比实验可以发现, 本文算法首先能够计算出周期内具体的预留值和预留时隙, 其次保障数据流能够在要求时延内到达, 并且不同周期内时延抖动可控, 最后便于带宽预留的思想落地实现。同时使用 SMT 方法针对单帧和多帧单条流周期性预留可以达到实验预期, 但是在多流不同周期时可能会产生抖动, 由于本文的方式是不同周期分开计算的, 因此在不同周期内可能会产生不同的带宽预留值, 这也是本文的遗留问题, 当前通过设置预留值取值空间范围, 避免差距过大的问题, 但是还不能消除抖动。除此之外, 如何确定带宽预留值之和与链路总带宽的占比也是本文未来的研究方向之一, 目的是更好地平衡背景流的传输和目标流之间的冲突。

带宽预留值计算方法还需要参考其他在网的数据流, 在一定范围内预留带宽值, 防止预留占据大部分的带宽空间, 同时预留方式适合小数据流量、时延要求不是非常高的数据流。

在使用本文周期性带宽预留之后, 预留的流量能够在要求的时延内传输完毕并且基本没有抖动, 同时也保障其他不需要预留流量的传输, 及时地释放预留带宽。相比以太网音频视频桥接技术固定带宽比预留情况提高带宽利用率, 经过本文预留之后的带宽利用率可达到 100%。

参考文献:

[1] 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.
- [2] DUJOVNE D, WATTEYNE T, VILAJOSANA X, et al. 6TiSCH: deterministic IP-enabled industrial Internet of things[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(12): 36-41.
- [3] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [4] JOHAS TEENER M D, GARNER G M. Overview and timing performance of IEEE 802.1AS[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Piscataway: IEEE Press, 2008: 49-53.
- [5] CRACIUNAS S S, OLIVER R S, CHMELÍK M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 1-8.
- [6] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Std 802.1QccTM-2018 Amendment 31: stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements[R]. 2018.
- [7] KUMAR R, HASAN M, PADHY S, et al. End-to-end network delay guarantees for real-time systems using SDN[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1703.01641, 2017.
- [8] SCHRIEGEL S, KOBZAN T, JASPERNEITE J. Investigation on a distributed SDN control plane architecture for heterogeneous time sensitive networks[C]//Proceedings of 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-10.
- [9] 吴文君, 姚海鹏, 黄韬, 等. 未来网络与工业互联网发展综述[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 163-172.
WU W J, YAO H P, HUANG T, et al. Survey of development on future networks and industrial Internet[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(2): 163-172.
- [10] 王涛, 王永强, 王康. 即时调度中周期调度最大化的带宽预留策略[J]. 软件, 2019, 40(12): 118-123.
WANG T, WANG Y Q, WANG K. Bandwidth reservation strategy for maximizing periodic scheduling in real-time scheduling[J]. Computer Engineering & Software, 2019, 40(12): 118-123.
- [11] 陈赓, 夏玮玮, 沈连丰. 基于多门限预留机制的自适应带宽分配算法[J]. 通信学报, 2014, 35(12): 78-88.
CHEN G, XIA W W, SHEN L F. Adaptive bandwidth allocation algorithm based on the multi-threshold reservation mechanism[J]. Journal on Communications, 2014, 35(12): 78-88.
- [12] LIN Y Y, WU Q S. Complexity analysis and algorithm design for advance bandwidth scheduling in dedicated networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(1): 14-27.
- [13] WANG T, WU C Q, WANG Y Q, et al. Multi-path routing for maximum bandwidth with K edge-disjoint paths[C]//Proceedings of 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1178-1183.
- [14] NAYAK N G, DÜRR F, ROTHERMEL K. Time-sensitive software-defined network (TSSDN) for real-time applications[C]//Proceedings of Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 193-202.
- [15] BHM M, OHMS J, KUMAR M, et al. Dynamic real-time stream reservation for IEEE 802.1 time-sensitive networks with OpenFlow[C]//8th International Conference on Applied Innovation in IT. [S.n.:s.l.], 2020: 1-8.
- [16] POZO F, STEINER W, RODRIGUEZ-NAVAS G, et al. A decomposition approach for SMT-based schedule synthesis for time-triggered networks[C]//Proceedings of 2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [17] BJØRNER N, PHAN A D, FLECKENSTEIN L. vZ - an optimizing SMT solver[C]//Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Berlin: Springer, 2015: 194-199.

[作者简介]



苏建忠 (1989-), 男, 江苏淮安人, 网络通信与安全紫金山实验室研究员, 主要研究方向为工业互联网、时间敏感网络、网络流量调度。

张华宇 (1986-), 男, 湖北十堰人, 博士, 网络通信与安全紫金山实验室研究员, 主要研究方向为工业互联网、未来网络、智能计算等。

朱海龙 (1987-), 男, 山东菏泽人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为工业互联网、确定性网络、工业以太网、软件定义网络、时间敏感网络和车载网络等。