2021 年 第 21 卷 第 35 期
2021, 21(35): 15093-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:李 江, 高会生, 曹旺斌. 基于 MATLAB/Simulink 的时间敏感网络时延特性仿真[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15093-15100.
Li Jiang, Gao Huisheng, Cao Wangbin. Simulation of time sensitive networking delay characteristics based on MATLAB/Simulink[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15093-15100.

电子技术、通信技术

基于 MATLAB/Simulink 的时间敏感网络时延特性仿真

李 江[1,2], 高会生[1,2*], 曹旺斌[1,2]

(1. 华北电力大学电子与通信工程系, 保定 071003; 2. 华北电力大学, 河北省电力物联网技术重点实验室, 保定 071003)

摘 要 为实现时间敏感网络流调度策略的优化设计,最大限度满足时间敏感应用的通信需求,有必要利用有效的仿真手段对时延特性进行全面研究。首先对时间敏感网络流控机制的工作原理和时延影响因素进行了分析,明确了时延特性仿真研究的基本目标;然后,比较了不同网络仿真方法的技术特点,选择 MATLAB/Simulink 作为仿真工具,设计了时间敏感网络时延模型和仿真算法;最后,针对主要流控机制应用场景,验证了基于 MATLAB/Simulink 的时间敏感网络时延仿真方法的可行性和正确性。研究成果对时间敏感网络时延特性研究和流控策略优化设计具有参考价值。

关键词 时间敏感网络; MATLAB/Simulink; 网络仿真; 时延分析

中图法分类号 TN91; **文献标志码** A

Simulation of Time Sensitive Networking Delay Characteristics Based on MATLAB/Simulink

LI Jiang[1,2], GAO Hui-sheng[1,2*], CAO Wang-bin[1,2]

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

[**Abstract**] The transmission delay of time sensitive networking is affected by many network factors, so it shows significant dynamic characteristics. In order to optimize the flow scheduling strategy and meet the communication requirements of time sensitive applications to the maximum extent, it is necessary to study the delay characteristics comprehensively by using effective simulation methods. Firstly, the working principle and delay influencing factors of time sensitive networking flow control mechanism were analyzed, and the basic goal of delay characteristic simulation research was defined. Then, by comparing the technical characteristics of different network simulation methods, the MATLAB/Simulink simulation tool was selected, and the delay model and simulation algorithm were designed. Finally, the feasibility and correctness of the simulation method were verified for the main application scenarios of flow control mechanism. The research results have reference value for time sensitive networking delay characteristics research and flow control strategy optimization design.

[**Keywords**] time sensitive networking; MATLAB/Simulink; network simulation; time delay analysis

时间敏感网络(time sensitive networking, TSN)允许时间敏感应用数据和尽力而为(best effort, BE)数据在传统以太网上同时传输,既能保证时间敏感数据传输的低时延、低抖动和零拥塞丢失,又能保证 BE 数据流的传输质量不会受到显著影响[1]。由于 TSN 在以太网上兼顾了时间敏感流和 BE 流的混合传输,所以在工业自动化和控制系统中具有广泛的应用前景[2]。特别是 TSN 已经作为 5G 前传网络的标准实现方案之一[3]。然而,端系统应用数据、网络运行环境、流量调度策略和网络状态参数等诸多因素,都会影响 TSN 的数据传输性能,使得 TSN 网络时延特性呈现出显著的动态性[4]。现阶段,网络仿真方法多样,因此选择有效的仿真手段实现 TSN 流量调度策略,研究 TSN 在不同网络

收稿日期: 2021-04-08; **修订日期**: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(62001166)

第一作者: 李 江(1996—),女,汉族,河北保定人,硕士研究生。研究方向:时间敏感网络。E-mail:lijncepu@163.com。

* **通信作者**: 高会生(1963—),男,汉族,河北保定人,博士,教授。研究方向:电力通信网可靠性优化、网络业务风险评估、通信网业务服务质量评估。E-mail:Gaohs007@sina.com。

环境和调度策略下的时延特性是十分必要的,以便更好地支撑 TSN 网络设计与应用。

现利用 MATLAB/Simulink 在算法编程实现和仿真功能定制建模方面的技术优势,实现 TSN 定制的时延建模,并设计仿真算法;在不同 TSN 流控机制的应用场景中,对 TSN 的时延特性进行仿真分析,验证利用 MATLAB/Simulink 进行仿真的有效性。对 TSN 时延特性分析和流控策略优化具有参考价值。

1 TSN 的数据传输时延

1.1 网络流模型

TSN 流定义为从发送端到接收端,通过时间敏感赋能网络实现的端到端单播或多播的网络连接[5]。设网络流集合 $F = \{f_1, f_2, \cdots, f_N\}$,其中 f_i 为第 i 个网络流。路径集合 $P_i = \{v_{i,s}, h_{i,1}, h_{i,2}, \cdots, h_{i,n_i}, l_i, v_{i,t}\}$,其中 $v_{i,s}$ 为流 f_i 的发送端;$h_{i,k}$ 为第 $k-1$ 个节点出口到第 k 个节点出口的链路与节点组合,称为“跳(hop)”,$k = 1,2,\cdots,n_i$;l_i 为接收端的网络连接线,也是 f_i 流的最终链路,$v_{i,t}$ 为接收端。

1.2 TSN 流控机制

相关标准化组织确定了多种 TSN 流控机制,用来提高时间敏感数据帧的传输时延特性,但所采用的技术手段各不相同。其中,时间感知整形器(time-aware shaper, TAS)、帧抢占(frame preemption, FP)及其两者的结合,在实际工程中应用最为广泛。

TAS 利用优先级排队和门控机制,保证周期性时间敏感数据的实时传输。TAS 在时间触发窗口中调度关键数据流量,保证时间关键数据流实时传输。TAS 在实现原理上与时分多址(time division multiple Access,TDMA)类似。为了避免低优先级流量(如尽力而为数据流量)对被调度的流量产生干扰,在时间窗口上为被调度流预留“保护带”(guard band),以此保护被调度流的发送状态,保证实时性。

FP 把数据帧分为高速帧和可抢占帧两类,允许高速帧抢占低速帧的发送资源,从而保证高速帧的实时传输。帧抢占将给定节点的出端口划分为可抢占 MAC(pMAC)端口和快速 MAC(eMAC)端口。可抢占帧在传输中占用的媒体资源可以被快速帧抢占。在抢占期间,媒体被快速帧占用,而被抢占帧的发送过程被中断,并分割为两个帧片段。当快速帧传输结束后,被抢占帧再重新恢复发送暂停的部分帧片段。接收节点的(media access control, MAC)利用合并层将分割的被抢占帧片段再重新拼接在一起,向(logical link control, LLC)层提交。帧抢占机制的主要目的是保证时间关键数据帧传输时延最小。

为避免保护带设置过长引起的带宽资源浪费现象,TAS 结合 FP 的流控机制可明显减少保护带的长度。下面重点研究 TAS、帧抢占及其两者结合,对 TSN 时延特性的影响。

1.3 TSN 时延模型

TSN 数据传输的端到端时延包含端设备时延、链路时延和 TSN 节点时延等 3 部分。本文重点研究链路时延和 TSN 节点时延。数据帧在链路和 TSN 节点所经历的主要处理过程如图 1 所示。

在图 1 中,SW_1、SW_2和 SW_3分别表示 TSN 交换机。IN_1、IN_2、IN_3和 IN_4分别表示交换机 SW_2的不同入口,OUT_1表示出口。$G_1 \sim G_7$表示队列出口控制门。数据帧进入交换机后,需要经过多个处理环节,$t_1 \sim t_7$表示每个环节会产生不同时延。其中,队列控制门的“打开”和“关闭”由门控列表(gate control list, GCL)同步控制。经过处理的数据帧从端口 OUT_1输出,并通过链路发送出去。把数据帧经过 1 条链路和 1 个 TSN 节点定义为 1 跳,即 $h_{i,k}$。每跳 $h_{i,k}$ 时延 $t_d(k)$ 共有 7 个时间分量。时间分量及其说明如表 1 所示。

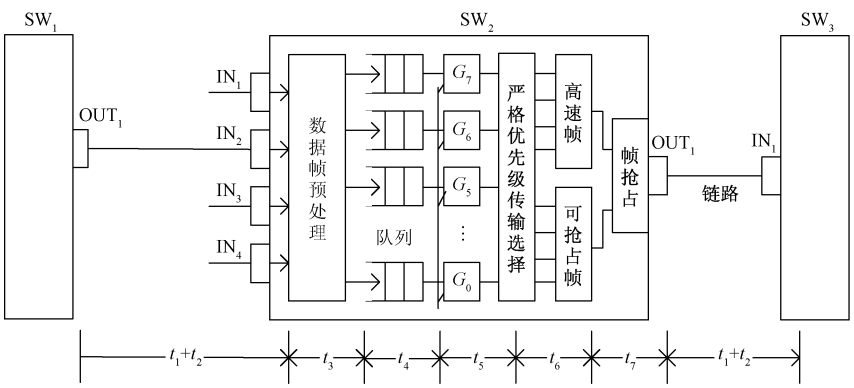


图 1 TSN 数据帧处理过程

Fig. 1 TSN data frame processing

表 1　TSN 每跳时间分量

Table 1　TSN hop time component

序号	时间分量	说明
1	$t_1(i)$	链路传播时延
2	$t_2(i)$	数据帧传输时延,取决于链路速率和帧长度
3	$t_3(i)$	TSN 节点对数据帧的预处理时间,依赖于硬件实现
4	$t_4(i)$	数据帧的排队时延,依赖于网络运行环境,具有不确定性
5	$t_5(i)$	严格优先级调度策略引起的时延
6	$t_6(i)$	TAS 调度时延,取决于 GCL 调度策略
7	$t_7(i)$	数据帧划分为高速帧和可抢占帧,并执行抢占操作

流 f_i 的端到端时延为

$$t_{i,\mathrm{E2E}} = \sum_{k=1}^{n_i} t_{\mathrm{d}}(k) \tag{1}$$

式(1)中:$t_{i,\mathrm{E2E}}$ 为流 f_i 的端到端时延;$t_{\mathrm{d}}(k)$ 为第 k 跳时延;n_i 为流 f_i 路径中的跳数。第 k 跳时延 $t(k)$ 为

$$t(k) = \sum_{m \in h_{i,k}} t_m(k) \tag{2}$$

式(2)中:$t_m(k)$ 对应图 1 中某个处理环节时延。

下面基于 MATLAB/Simulink 的仿真方法,对式(1)和式(2)的时延特性进行研究。

2　仿真方法的设计

2.1　仿真工具的选择

TSN 时延仿真方法包括:实物仿真[6]、OPNET 平台[7]、OMNeT ++ 平台[8]等。文献[9]还给出了一种 TSN 流控机制的测试方案。文献[10]提出了一种基于 NS-2 的网络仿真方法。OPNET、OMNeT ++、NS-2 都是常用网络仿真工具。然而,TSN 仿真主要是底层仿真,重点集中在链路控制子层,难以发挥 OPNET、NS-2 的优势,且 OMNeT ++ 需要进行大量的功能开发。因此,商用网络仿真平台缺乏灵活性,难以真正发挥作用。鉴于此,文献[11]对 TSN 时延特性仿真方法进行了比较研究,认为 MATLAB/Simulink 支持多种数据链路层仿真控件,能够向用户提供可定制建模工具,具有高度灵活性,同时还可以充分利用 MATLAB 强大编程能力来提高仿真性能。本文中采用 MATLAB/Simulink 进行 TSN 时延仿真。本文中出现的 Simulink 模块实现图均采用"省略式"画法,各模块在 Simulink 中均可找到对应模块。

2.2　基于 MATLAB/Simulink 的 TSN 时延模型

根据 TAS 流控机制的工作原理,本文中设计的 MATLAB/Simulink 时延仿真系统,如图 2 所示。

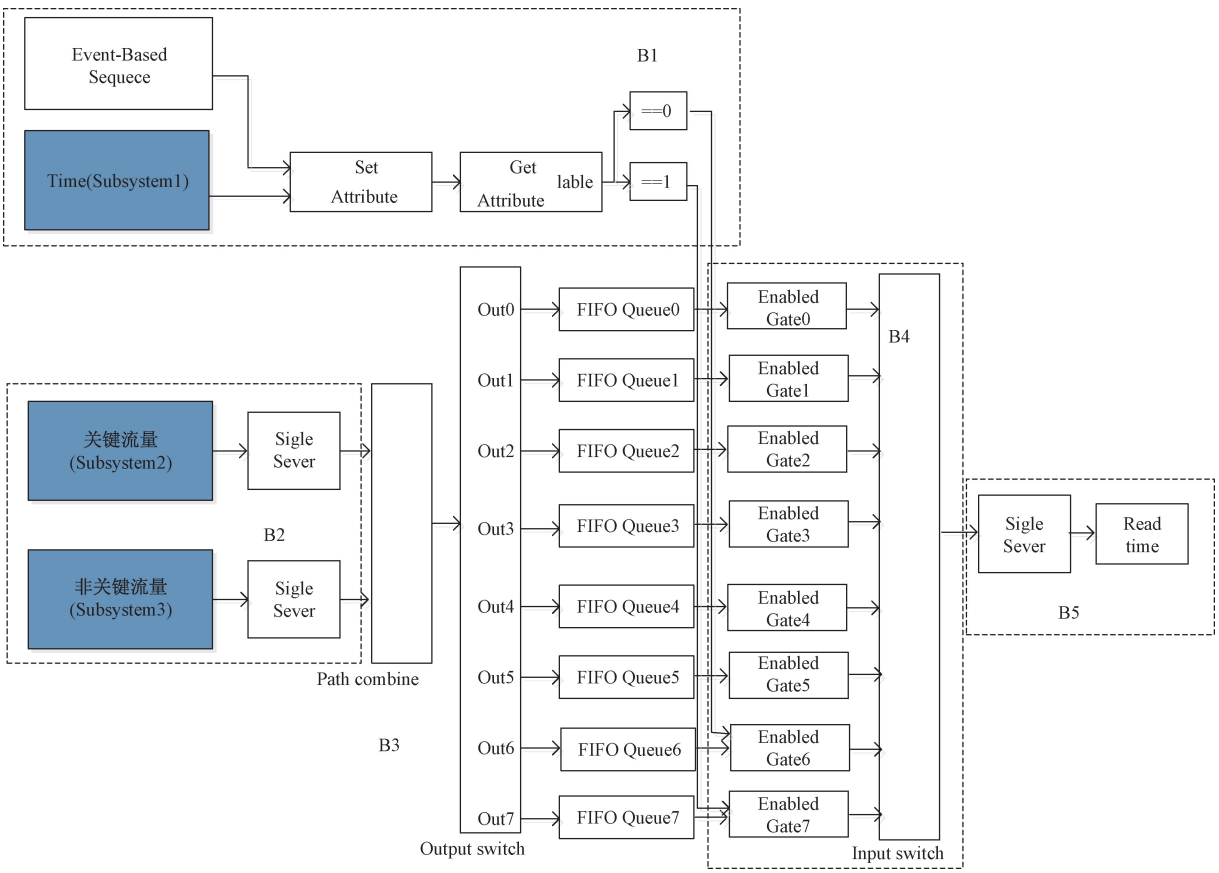


图 2　TAS 时延仿真系统

Fig. 2　TAS time delay simulation system

图2 仿真系统由5部分组成,分别表示为B1 ~ B5。其中,B1 实现门控列表(goat control list,GCL)功能;B2 产生仿真数据流,包括关键流和非关键流;B3 实现优先级排队;B4 实现 TAS 的逻辑门控制;B5 按严格优先级调度策略,实现单服务器端口输出。

通过仿真测量数据帧 B2 ~ B5 的传输时间,仿真模型实现 TSN 的时延统计分析。B1 利用MATLAB/Simulink 事件序列发生器产生 GCL 门控信号,进一步控制逻辑门的开/关状态。可以看出,Simulink 工具箱具有较强的建模能力和可视化功能,有助于实现 TSN 的时延仿真过程。

图2 仅说明了 TAS 的仿真模型,其他流控机制的建模与之类似。这些模型通过扩展和级联,可构成更为复杂的 TSN 模型,以满足大规模 TSN 系统的时延仿真需求。

2.3 算法设计

现有的仿真工具不能直接对 TSN 的流控机制进行仿真,因此本文中利用 MATLAB/Simulink 工具箱提供的可视化建模功能,并结合 MATLAB 的编程能力,对 TSN 的 TAS 和 FP 两种主要流控机制进行了端到端时延的仿真研究。

2.3.1 整体流程

时延仿真的整体流程如图3 所示。在垂直方向上,流程划分为 MATLAB 程序开发和 Simulink 工具箱建模两部分。MATLAB 程序实现网络流初始数据序列的产生,不同控制参数的计算,以及仿真结果的统计分析。Simulink 工具箱完成可视化 TSN 建模,在给定配置参数下实现排队和发送服务等过程。将 MATLAB 程序开发和 Simulink 工具箱可视化建模功能相结合,可最大限度发挥 MATLAB/Simulink的协同仿真优势。

在图3 中,有向虚线表示 MATLAB 程序和 Simulink工具箱之间信息交互的过程。

2.3.2 流程说明

(1)网络流初始数据序列的产生。流量的产生可由 Simulink 中的 Event-Based Sequence 块获得,此块与 MATLAB 结合使用,MATLAB 程序根据被仿真系统的网络拓扑、链路速率、数据流分布、数据流描述参数和数据序列长度,随机产生仿真过程需要的数据序列,作为被仿真的数据流。

(2)优先级队列。优先级队列为交换机输出端口的缓冲区,数据帧进入交换机按要求转发至目的输出端口。交换机最多有 8 个输出端口,每个输出端口对应一种优先级类型,如果队列少于 8 个,则每个队列可以包含多种优先级的流,进入队列的帧由帧优先级决定,具体队列结构示意图如图4 所示,此模块在 Simulink 实现如图2 中 B3 所示。

最简单的传输选择算法是先进先出(first in first out,FIFO),Simulink 中 Output Switch 根据帧的优先级选择输出端口,不同输出端口代表不同优先级队列,也可以选择用 Priority Queue 模块,可实现严格优先级传输选择算法。

(3)门控模块。门控模块是 TSN 流控机制实现的重点。TAS 机制在优先级队列后添加门结构,通过门的开关控制数据帧是否从队列输出。门的开关由门控列表(gate control list,GCL)控制。门控列表根据实际情况设定,在调度周期中循环更新。本文中门控列表的生成由 MATLAB 编程实现。此模块实现如图5、图6 所示。具体块作用如表2 所示。

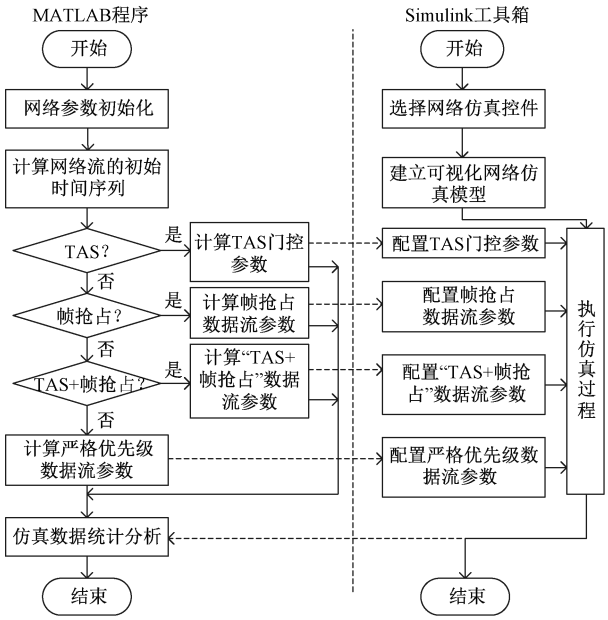


图3 总体流程

Fig. 3 Overall process

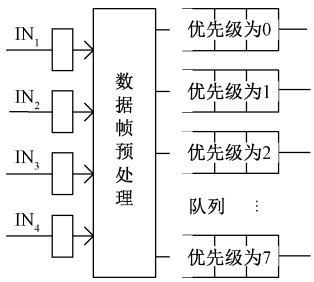


图4 优先级队列结构示意图

Fig. 4 Priority queue structure diagram

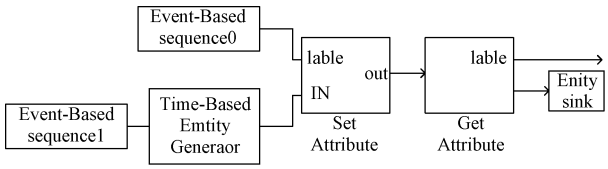


图5 GCL 产生模块

Fig. 5 GCL generation module

门控模块中只截取了部分队列的仿真图,其中,GCL 中“1”为敏感流队列门开,“2”为非敏感流队列门开,“0”为队列门关,以此来控制队列中的数据传输。具体门控制方法如算法 1 所示。

(4)帧抢占模块。帧抢占功能的实现最重要的是低速帧的切片以及高速帧的抢占。图 7 为高、低速帧的分类,Path Combiner 模块是将链路合并成一条将帧输出,其余模块与上述作用相同。

每个帧都自带发送时间的时间戳,帧分类后,可根据其时间戳判断是否可以抢占,具体帧的切分和抢占算法代码如算法 2 所示。

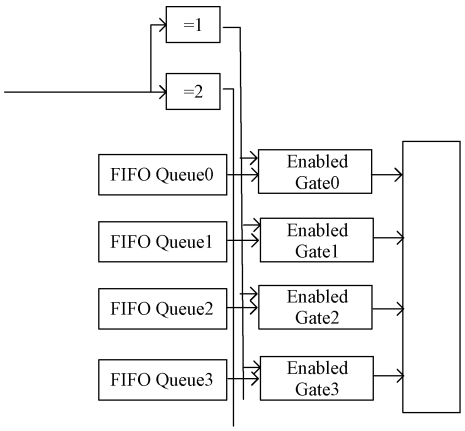


图 6　门控模块

Fig. 6　Door control module

表 2　具体块的作用

Table 2　The role of specific modules

Simulink 块	作用
Event-Based Sequence0	定义门的开(1/2)闭(0)状态
Event-Based Sequence1	定义门开闭状态的时间
Time-Bases Entity Generator	实体生成器(由门开闭时间决定)
Set Attribute	将开闭状态附在实体上
Get Attribute	获取时间—状态参数,控制门的
Enabled Gate	状态门

算法 1 门控算法

```
1. gate =[1,2]';/*1 关键门开,2 关键流门关,非关键流开*/
2. gatetime =[t_open,t_close]';/* t_open关键流门开时刻,t_close关键流门关,非关键流门开时刻*/
3. gatetime1 = repeat(gatetime,pe,1);/* pe 循环次数*/
4. for i=1:size(gatetime1,1)
5. m = (i-1)/2;
6. J=fix(m);
7. gatetime2 = gatetime1(i,1)+j*Ts;/*Ts 周期*/
8. end
9. gatetable(:,1) = gatetime2;/*时间列*/
10. gatetable(:,2) = gate;/*开关列*/
```

(5)流控仿真场景设计。本文中共设计了 6 种流控场景,仿真研究不同流控机制下的 TSN 时延特性,如表 3 所示。

在表 3 中,场景 1 指 TSN 仅采用纯粹严格优先级发送选择策略。TAS 分为最大保护带、动态保护带和门控压缩 3 种场景。帧抢占实现快速帧对低速帧的抢占。帧抢占结合 TAS,既减小保护带,又实现帧抢占。

2.3.3　仿真结果统计分析

利用模块 B1 生成相应的事件序列 $Y_i=(y_{i,1},y_{i,2},\cdots,y_{i,\mathrm{NF}_i})$,其中 NF_i 表示流包含的数据帧数量。

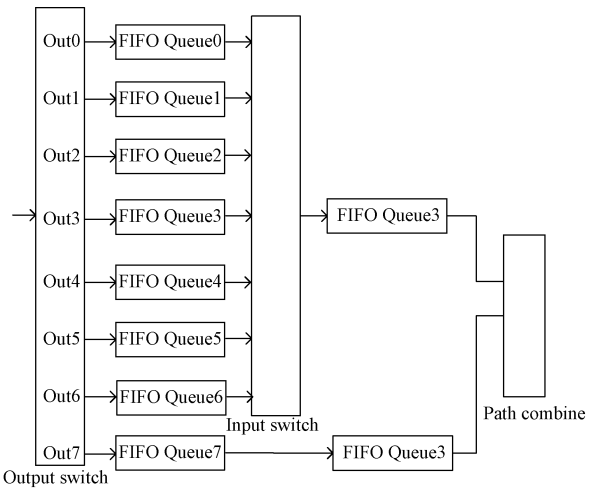


图 7　帧抢占模块

Fig. 7　Frame preemption module

算法 2 帧抢占过程算法

```
1. for every frame do
2.   if this frame ~=1 && next frame ==1
3.     if t_低速帧结束 - t_高速帧到达 > t_64字节 && t_高速帧到达 - t_低速帧到达 > t_60字节
4.       then start slicing
5.       length_切片1 = length_已传输低速帧 + length_CRC校验码
6.       length_切片2 = length_原帧长 - length_已传输低速帧 + length_前导码 + length_帧间隔
7.       transmit according to priority with Simulink
8.     end
9.   end
10.  break
11. end
```

表 3　流控仿真场景

Table 3　Flow control simulation scenario

场景	流控机制	简称	说明
1	严格优先级调度	RP	划分 8 等级,0 为最低,7 为最高
2	TAS(最大保护带)	TAS1	保护带设为最大帧传输时间
3	TAS(动态保护带)	TAS2	根据帧长度,保护带动态调整
4	TAS(门控压缩)	TAS3	将相邻帧门控窗口合并,压缩保护带
5	帧抢占	FP	高速帧抢占低速帧的发送资源
6	帧抢占结合 TAS	FP+TAS	帧抢占与 TAS 相结合

算法按照设定的流传输路径,对 Y_i 进行仿真,得到时延影响后的事件序列 $Y'_i=(y'_{i,1},y'_{i,2},\cdots,y'_{i,\mathrm{NF}_i})$。将两个事件序列相减,得到流 f_i 端到端时延向量 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{d},i}=(t_{i,1},t_{i,2},\cdots,t_{i,\mathrm{NF}_i})$,其中 $t_{i,j}$ 等价于式(1)的 $t_{i,\mathrm{E2E}}$。对时延向量作统计分析,得到流 f_i 时延的下限、上限、均值和标准差等 4 个分布特征参数。

3 算例

3.1 算例说明

为了验证基于 MATLAB/Simulink 的仿真方法的可行性和正确性,本文中设计的 TSN 仿真算例如图 8 所示。图 8 代表了汽车的控制网系统,算例部署 7 条数据流,分为关键流和非关键流两种类型。其中,HA1、HA2 分别表示左、右后视镜传感器,HB1、HB2 分别表示汽车前、后传感器,BE1、BE2、BE3 分别表示汽车多媒体播放系统、左前轮传感器和右前轮传感器。SW_1、SW_2、SW_3 为交换机。根据上述系统,HA1、HA2、HB1 和 HB2 为关键流;BE1、BE2 和 BE3 为非关键流。链路的传输速率均为 100 Mbps。数据流的相关信息如表 4 所示。

表 4 对应流的特征参数。关键流的帧长固定,且周期性传输,帧间隔为 2 ms。非关键流的帧长和帧间隔可变,并服从均匀分布。数据帧开销为 42 字节,帧长范围为[84, 1 542]字节。

根据表 4 提供的数据,本文中利用所提算法对不同场景下的 TSN 时延特性进行仿真。利用图 2 的建模方法,本算例根据图 8 的网络结构,建立了 TSN 全系统的 MATLAB/Simulink 仿真模型。

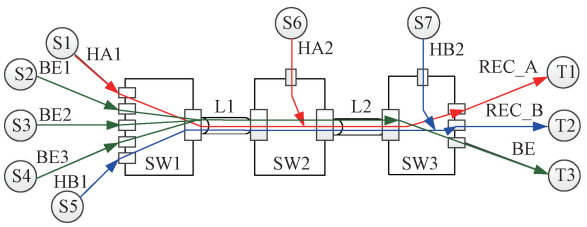


图 8 TSN 系统仿真算例

Fig. 8 TSN system simulation example

表 4 数据流信息

Table 4 Data flow information

序号	标号	类型	优先级	源	目的	载荷/Byte	帧间隔/ms
1	HA1	关键	7	S1	T1	500	2
2	HA2	关键	7	S6	T1	500	2
3	HB1	关键	7	S5	T2	500	2
4	HB2	关键	7	S7	T2	500	2
5	BE1	非关键	0	S2	T3	1 000 ~ 1 500	0.45 ~ 0.55
6	BE2	非关键	1	S3	T3	1 000 ~ 1 500	0.45 ~ 0.55
7	BE3	非关键	2	S4	T3	1 000 ~ 1 500	0.45 ~ 0.55

3.2 场景设置

本文将关键流和非关键流的流量之比 R 作为仿真场景划分准则,且定义

$$R=\frac{B_{\mathrm{CR}}}{B_{\mathrm{CR}}+B_{\mathrm{NR}}}\times 100\% \tag{3}$$

$$B_{\mathrm{CR}}+B_{\mathrm{NR}}\leqslant 90\%\times B_{\mathrm{Link}} \tag{4}$$

式中:$B_{\mathrm{CR}}=\sum_{i=\mathrm{CR}}B_i$ 表示关键流量 CR 之和;$B_{\mathrm{NR}}=\sum_{i=\mathrm{NR}}B_i$ 表示非关键流量 NR 之和;B_{Link} 为链路速率。总流量应满足条件:$B_{\mathrm{CR}}+B_{\mathrm{NR}}\leqslant 90\%\times B_{\mathrm{Link}}$。

不同 R 下各类流的分配如表 5 所示。表 5 的 3 种流分配与表 3 的 6 种流控机制相互组合,得到 18 种仿真场景,共计 90 组不同流的时延数据。每组数据包含 400 个样本值。统计后得到每组数据的时延统计特征量。

表 5 不同仿真场景的流分配

Table 5 Flow allocation in different simulation scenarios

场景	R/%	流分配
1	25	HA1、BE1、BE2、BE3
2	50	HA1、HA2、HB1、BE1、BE2、BE3
3	80	HA1、HA2、HB1、HB2、BE1

3.3 结果分析

3.3.1 不同调控机制下的时延特性

选择 HA1 和 BE1 两种流的进行分析。在严格优先级(SP)、最大保护带 TAS(TAS1)和帧抢占(FP)等 3 种流控机制下,流 HA1 和 BE1 的时延均值和时延标准差如表 6 所示。

可以看出,在不同流控机制以及不同流量占比条件下,关键流和非关键流具有不同的时延特性。

时延标准差反映时延抖动程度,可知在不同流控机制和不同流量占比条件下,关键流和非关键流时延抖动性能也不相同。这充分说明,TSN 的流配

表 6 流 HA1 和 BE1 的时延均值和标准差

Table 6 Average delay and delay standard deviation of streams HA1 and BE1

R/%	时延均值/μs					
	SP_HA1	SP_BE1	TAS1_HA1	TAS1_BE1	FP_HA1	FP_BE1
25	282.3	478.8	198.6	503.2	198.8	503.2
50	283.9	486.4	198.6	557.2	199.0	557.2
80	208.6	440.4	198.6	459.2	198.6	459.2
R/%	时延标准差/μs					
	SP_HA1	SP_BE1	TAS1_HA1	TAS1_BE1	FP_HA1	FP_BE1
25	54.5	66.0	0	84.1	4.0	89.9
50	58.0	70.3	0	125.6	9.0	131.0
80	28.4	37.0	0	68.7	1.0	87.4

置场景和流控机制对时延及抖动的影响机理较为复杂,需要综合优化才能使 TSN 的整体时延性能满足要求。

3.3.2　不同保护带对时延的影响

对最大保护带(TAS1)、动态保护带(TAS2)和门控压缩(TAS3)等 3 种 TAS 保护带操作方式进行了仿真。表 7 给出了流 HA1 和 BE1 在不同保护带方式下的时延均值和标准差。

表 7　不同保护带下 HA1 和 BE1 流的时延均值和标准差

Table 7　Average delay and delay standard deviation of HA1 and BE1 flows with different protection bands

R/%	时延均值/μs					
	TAS1_HA1	TAS1_BE1	TAS2_HA1	TAS2_BE1	TAS3_HA1	TAS3_BE1
25	198.6	503.2	198.6	500.3	—	—
50	198.6	557.2	198.6	529.2	247.2	529.2
80	198.6	459.2	198.6	448.9	247.2	446.5
R/%	标准差均值/μs					
	TAS1_HA1	TAS1_BE1	TAS2_HA1	TAS2_BE1	TAS3_HA1	TAS3_BE1
25	0	84.1	0	81.5	—	—
50	0	125.6	0	109.3	0	109.3
80	0	68.7	0	68.0	0	64.3

由于在 $R=25\%$ 场景中,仅有 HA1 一个关键流,不存在门控压缩问题,所以没有仿真数据。由表 7 可知,TAS2 可以降低非关键流的时延。TAS3 合并控制窗口,导致关键流时延增大;动态保护带对非关键流抖动的影响明显小于最大保护带。

3.3.3　FP 结合 TAS 方式对时延的影响

对 FP、TAS1 和 FP 结合 TAS 等 3 种流控机制进行了仿真。表 8 给出了流 HA1 和 BE1 的时延均值和标准差。

表 8　FP 条件下 HA1 和 BE1 流的时延均值和标准差

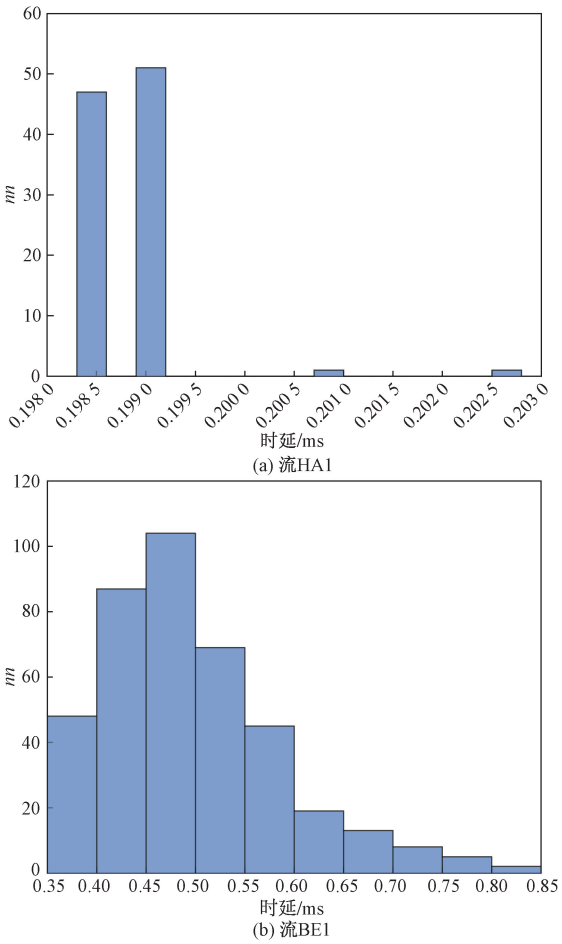
Table 8　Average delay and delay standard deviation of HA1 and BE1 flows under FP condition

R/%	时延均值/μs					
	TAS1_HA1	TAS1_BE1	FP_HA1	FP_BE1	FP+TAS_HA1	FP+TAS_BE1
25	198.6	503.2	198.8	503.2	198.8	495.4
50	198.6	557.2	199.0	557.2	198.8	537.1
80	198.6	459.2	198.6	459.2	198.6	473.4
R/%	标准差均值/μs					
	TAS1_HA1	TAS1_BE1	FP_HA1	FP_BE1	FP+TAS_HA1	FP+TAS_BE1
25	0	84.1	4.0	89.9	4.0	89.9
50	0	125.6	9.0	131.0	3.0	122.2
80	0	69.0	1.0	87.4	1.0	90.1

由表 8 可知,关键流在 3 种机制下都具有良好的时延特性,且 TAS1 性能最佳。然而,非关键流却在 FP 结合 TAS 机制(FP+TAS)下具有最佳的时延性能。TAS1 可做到关键流的抖动近似为零,但 FP 和 FP+TAS 却不能。

仅当可抢占帧的长度满足相应条件时才能被抢占,并且抢占后的初始帧片段需要额外增加 4 字节的校验字段,因此,这些因素会影响数据帧的时延和抖动。流 HA1 和 BE1 在 $R=25\%$ 条件下的统计直方图如图 9 所示。

由图 9(a)可知,关键流 HA1 的两类最大统计样本之间相差 0.32 ms,这正好对应 100 Mbps 链路速率下 4 字节校验字段的传输时间。相比之下,图 9(b)给出的非关键流 BE1 统计直方图则接近于对数正态分布,而时延具有明显不确定性。



横坐标是时延,纵坐标是帧的个数

图 9　流 HA1 和 BE1 时延的统计直方图

Fig. 9　Statistical histogram of delay of HA1 and be1 streams

4　结论

针对 TSN 时延特性仿真的功能需求,提出了一种基于 MATLAB/Simulink 工具箱的 TSN 时延特性

仿真方法。该方法具有建模灵活、实现方便的特点,提供了网络底层仿真控件,特别是以太网控件,实现较容易。在此基础上,根据 TSN 流控机制和流调度原理,专门开发相应的仿真模型,可以实现与文献[6,10]中常规网络仿真平台完全等价的仿真功能,并用算例验证了方法的可行性和实验结果的正确性。该方法可定制实现 TSN 专属流控机制的建模,并充分发挥 MATLAB 编程环境灵活交互的能力,进一步增强仿真结果的数据处理和统计分析能力;利用 Simulink 工具箱提供的多种可视化基础控件,高效建立 TSN 仿真系统模型,适合于 TSN 及其应用系统的仿真。研究结果表明,所提仿真方法具有工程参考价值。下一步工作将针对 TSN 工程应用问题中流控机制优化开展深入研究。

参 考 文 献

[1] IEEE Computer Society. Local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks: IEEE Std 802.1—2018[S]. New York: IEEE Computer Society, 2018.

[2] Vitturi S, Zunino C, Sauter T. Industrial communication systems and their future challenges: next-generation ethernet, IIoT, and 5G [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1-18.

[3] IEEE Computer Society. Local and metropolitan area networks-time-sensitive networking for fronthaul: IEEE Std 802.1CM—2018[S]. New York: IEEE Computer Society, 2018.

[4] 宋华振. 时间敏感型网络技术综述[J]. 自动化仪表, 2020, 41(2): 1-9.
Song Huazhen. Overview of time sensitive network technology[J]. Automation Instrumentation, 2020, 41 (2): 1-9.

[5] Nasrallah A, Thyagaturu A S, Alharbi Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 88-145.

[6] Jun H J, Yu T L, Seung H H. A simulation model for time-sensitive networking(TSN) with experimental validation[C]//2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), New York: IEEE Computer Society, 2019: 153-160.

[7] Pahlevan M, Obermaisser R. Evaluation of time-triggered traffic in time-sensitive networks using the OPNET simulation framework [C]//2018 26th Euromicro International Conference on Parallel. New York: IEEE Computer Society, 2018: 283-287.

[8] Heise P, Geyer F, Obermaisser R. TSimNet: an industrial time sensitive networking simulation framework based on OMNET + + [C]//2016 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). New York: IEEE Computer Society, 2016: 1-5.

[9] 孟 星, 胡怡红, 寿国础. TSN 中时间感知整形器测试方案设计及实现[J]. 测控技术, 2020(10): 93-96.
Meng Xing, Hu Yihong, Shou Guochu. Design and implementation of test scheme for time perception shaper in TSN[J]. Measurement and Control Technology, 2020(10): 93-96.

[10] 张育芝, 张效民, 王安义, 等. 水声通信网络信道建模与仿真研究进展[J]. 科学技术与工程, 21(4): 13.
Zhang Yuzhi, Zhang Xiaomin, Wang Anyi, et al. Research progress onchannel modeling and simulation of underwater acoustic communication network[J]. Science Technology and Engineering, 21, 21(4): 1249-1261.

[11] Xie D, Li J, Gao H S. Comparison and analysis of simulation methods for TSN performance[C]//IOP Conference Series Materials Science and Engineering. London: IOP Publishing, 2020: 52-61.