

文章编号: 2095-2163(2024)03-0086-07

中图分类号: TP393.11

文献标志码: A

# 无人战车中混合业务流整形调度的研究

冀崇傑, 侯鸿雁

(北方自动控制技术研究所, 太原 030006)

**摘要:** 随着智能化、无人化的发展,无人战车车载网络需要同时满足高带宽业务流传输和实时业务流传输的需求。通过研究无人战车的混合流量传输的确定性时延需求,基于时间敏感网络中将严格优先级调度算法、基于信用的调度算法和基于门控的时间感知整形调度算法,这3种算法混合使用,实现无人战车混合业务流的整形调度。

**关键词:** 无人战车; 确定性时延; 时间敏感网络

## Research on hybrid business flow shaping and scheduling in unmanned combat vehicles

JI Chongjie, HOU Hongyan

(North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** With the development of intelligence and unmanned technology, the onboard network of unmanned combat vehicles needs to meet the requirements of both high bandwidth and real-time traffic transmission. By studying the deterministic delay requirements of hybrid traffic transmission for unmanned combat vehicles, strict priority scheduling algorithms, credit based scheduling algorithms, and gating based time aware shaping scheduling algorithms are used in time sensitive networks. The three algorithms are mixed to achieve shaping and scheduling of mixed business flow for unmanned combat vehicles.

**Key words:** unmanned tank; deterministic delay; time sensitive network

## 0 引言

随着无人战车在态势接入、周边战场实时监测、目标自动跟踪识别、自主机动、自主协同控制等方面提出的新需求<sup>[1]</sup>,需要配置更多的战术无线通信、光电和射频传感、信息处理等设备,承载的业务类型和数量迅猛增加,产生了新的视频、音频、高频信号等大容量数据传输需求,因此需要将带宽由1 Gbps提升至10 Gbps。同时,面向无人战车战场高速机动、目标敏捷打击等能力,以及行进、调炮、发射等实时控制功能<sup>[2]</sup>,时延要小于500 us,抖动为几微秒,因此需要在传输高带宽信息的同时,保障其关键信息的实时性。当前重型无人战车的车载总线网络协议主要是控制器域网(Controller Area Network, CAN)、局域网(Local Area Network, LIN)、面向媒体的系统传输总线(Media Oriented System Transport, MOST)和FlexRay等通讯协议<sup>[3]</sup>,已无法满足当前重型无人战车需要的高带宽、高实时要求。为此,

需要根据无人战车车载实时网络的资源使用情况,对无人战车中时间计划业务流(Scheduled Traffic, ST流)、速率限制业务流(Rate Constrained, RC流)和尽力传输业务流(Best Effort, BE流)构成的混合业务流进行综合调度。合理分配网络资源,充分满足业务应用对无人战车骨干网络的数据传输需求,为多类型业务混合共网传输提供确定性时延保障。

确定性网络技术能够在以太网的基础上提供端到端的确定性服务<sup>[4]</sup>。时间敏感网络是其中重要的组成部分,通过时间同步、流量整形调度和网络配置管理等机制,在保证时间敏感数据传输实时性和确定性的同时,保证非时间敏感数据的尽力传输。通过其中相关协议提出的严格优先级算法、基于信用的整形算法和时间感知整形算法,能够为高实时性数据提供确定性传输保障。

但是,每一种整形算法都有其局限性。如:严格优先级算法规定数据严格按照优先级传输,只有当

**作者简介:** 冀崇傑(1999-),男,硕士,主要研究方向:确定性网络,Email:Jichongjie@foxmail.com; 侯鸿雁(1990-),女,硕士,工程师,主要研究方向:逻辑设计、实时网络。

收稿日期: 2023-10-24

高优先级数据传输结束之后低优先级数据才能传输,这可能会导致高优先级数据长期占用链路,使得低优先级数据不能传输,即在传输过程中产生阻塞,因此严格优先级算法可能会产生更大的延迟和抖动<sup>[5]</sup>。基于信用的整形调度算法是通过控制信用值来进行调度<sup>[6]</sup>。然而,当队列中有多个数据帧等待发送时,信用值的控制会导致数据传输平均时延的增加,因此基于信用的整形调度算法虽然能够满足音视频业务传输的需求<sup>[7]</sup>,但是却不能满足更低时延和更低抖动的控制业务要求。时间感知整形调度算法的核心是门控机制,由于门控制调度的控制列表设定与流的性质相关,因此调度恒定比特流(Constant BitRate, CBR)时,每个调度周期产生的调度结果会保持一致,从而提供零抖动的性能<sup>[8]</sup>。但是,如果时钟同步的精度较差,一个帧在门打开的时候应该被马上传输,由于同步精度不够,产生了较大的同步误差,导致这个帧不能及时传输出去,那么这个帧就会延迟一个周期传输,产生较大的延迟和抖动。

基于以上条件的制约,本文提出了将这3种整形调度算法优势结合起来使用,从而实现在保障高实时性数据确定性和可靠性传输的同时,能够传输低实时性的数据。

### 1 无人战车中混合流量传输的确定性时延需求

无人战车是一个高度互联的分布式系统,具有

上百个电子控制单元和上千个信号,这些电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)和信号执行各种重型无人战车的功能<sup>[9-10]</sup>。而随着信息化作战的需要,无人战车提出了一些新的需求。如:态势接入、周边战场实时监测、目标自动跟踪识别、自主协同控制等。这就要求增加更多的战术无线通信、光电和射频传感、高效能信息处理等设备<sup>[11]</sup>。但是,这会导致承载的业务类型和数据迅猛增加,产生新的视频、音频、高频信号等大容量数据传输需求,于是要求带宽由1 Gbps提升至10 Gbps。同时,面向重型无人战车战场高速机动、目标敏捷打击等能力,以及行进、调炮、发射等实时控制功能,要求在传输高带宽、大数据量信息的同时,保障其关键信息的实时性和确定性。

无人战车紧急制动网络架构如图1所示。假设无人战车的行驶速度为60 km/h,无人战车有机会在0.2 s内紧急制动,那么其制动反应距离是3.33 m。无人战车制动时业务流传输特性见表1,无人战车加装更多的环境感知传感器(如:摄像头、激光雷达、毫米波雷达等)进行数据处理和路径规划,对于这些大数据量的传输,需要更大的带宽来传输数据。而底盘控制信号是实时传输,要求时延小于10 μs,抖动为几微秒,丢包率为0.000 1%。为了能在大数据量传输的同时满足实时传输要求,这就需要使用数据调度整形机制,来实现混合流量传输的确定性传输。

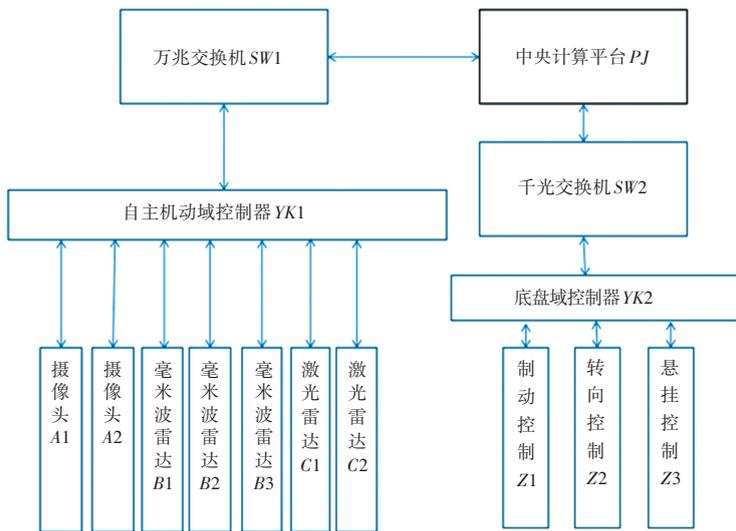


图1 无人战车网络架构(制动)

Fig. 1 Unmanned tank network architecture (braking)

表1 无人战车制动时业务流传输特性

Table 1 Traffic transmission characteristics of unmanned combat vehicles during braking

	传输数据特性	传输数据量	源	目的	传输路径	传输时延分析	确定性要求	所占链路带宽
前置 摄像 头 A1	1 080 p@60 Hz 可监测距 离 150 m 视场角 60°	1.85 Gbps	A1	PJ	A1 - YK1 - SW1-PJ	A1-YK1:4 ms YK1-SW1:4 ms SW1-PJ:2 ms	时延:10 ms 抖动:500 μs 丢包率:0.000 1%	PJ: 18.54%
前置 摄像 头 A2	1080 p@60 Hz 可监测距 离 150 m 视场角 60°	1.85 Gbps	A2	PJ	A2 - YK1 - SW1-PJ	A2-YK1:4 ms YK1-SW1:4 ms SW1-PJ:2 ms	时延:10 ms 抖动:500 μs 丢包率:0.000 1%	PJ: 18.54%
正向 毫米 波雷 达 B1	探测范围 100~250 m,水 平角 ±60°,仰视角 ±5°, 点云成像不低于 10 万 点/s@20 Hz 接入	0.238 Gbps	B1	PJ	B1 - YK1 - SW1-PJ	B1-YK1:200 μs YK1-SW1:200 μs SW1-PJ:100 μs	时延:500 μs 抖动:几微秒 丢包率:0.000 1%	PJ: 2.38%
侧向 毫米 波雷 达 B2	探测范围 100~250 m,水 平角 ±60°,仰视角 ±5°, 点云成像不低于 10 万 点/s@20 Hz 接入	0.238 Gbps	B2	PJ	B2 - YK1 - SW1-PJ	B2-YK1:200 μs YK1-SW1:200 μs SW1-PJ:100 μs	时延:500 μs 抖动:几微秒 丢包率:0.000 1%	PJ: 2.38%
激光 雷达 C1	不小于 128 线@10 Hz 水平角分辨率为 0.2° 量程:0.05 m 到 120 m	0.275 Gbps	C1	PJ	C1 - YK1 - SW1-PJ	C1-YK1:200 μs YK1-SW1:200 μs SW1-PJ:100 μs	时延:500 μs 抖动:几微秒 丢包率:0.000 1%	PJ: 2.75%
激光 雷达 C2	不小于 128 线@10 Hz 水平角分辨率为 0.2° 量程:0.05 m 到 120 m	0.275 Gbps	C2	PJ	C2 - YK1 - SW1-PJ	C2-YK1:200 μs YK1-SW1:200 μs SW1-PJ:100 μs	时延:500 μs 抖动:几微秒 丢包率:0.000 1%	PJ: 2.75%
中央 计算 平台 PJ	总算力达到 100 KDMIPS 处理大容量数据和复杂 逻辑			PJ	Z1	PJ - SW2 - YK2-Z1	PJ-SW2:2 μs SW2-YK2:4 μs YK2-Z1:4 μs	时延小于 10 μs,抖 动为几微秒,丢包率 为 0.000 1%

## 2 国内外数据调度整形算法

时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)的提出为无人战车车载网络中混合业务流传输的确定性和实时性的实现提供了思路<sup>[12-13]</sup>。其核心思想是首先将网络中需求不同的流量分成不同的优先级流,将有确定性需求的流量与其余流量区分开;然后采用时分复用的思想,通过不同的流量整形机制,为高优先级流量提供确定的传输时隙,以保证时间敏感流量有确定的传输路径<sup>[14]</sup>。

### 2.1 严格优先级调度算法

严格优先级调度算法根据帧的优先级进行区分排队并调度,每次都是选择当前优先级最高的帧进行调度<sup>[15]</sup>。严格优先级调度算法按照优先级进行顺序排队,高优先级的队列比低优先级的队列具有更高的优先权,保障高优先级数据更快地被服务<sup>[16]</sup>。在一个分组传输的链路中,优先传输高优先级的队列,只有当高优先级的队列为空时,整形调度

器进行低优先级的队列传输,严格优先级调度算法主要用于维护一个优先级递减的队列按照先后顺序进行数据传输。

### 2.2 门控调度算法

门控制调度算法利用队列连接的门开关控制队列输出<sup>[17]</sup>。门控制调度算法在不考虑时钟同步误差的情况下,能够给高优先级流提供较好的传输保障<sup>[18]</sup>。TSN中IEEE802.1Qbv提出的时间感知整形调度机制的核心,就是时间感知的门控机制。通过设置与时间关联的门控列表,实现时间对门状态的控制,进而允许或者禁止传输选择功能从相应的队列中选择数据,对其转发<sup>[19]</sup>。因此,数据在链路中的传输时延是可以预测的,数据到达下一个节点的时间也是可以预测的,从而实现了数据传输的确定性。

### 2.3 基于信用的整形调度算法

基于信用的整形器是IEEE 802.1AVB标准中的重要组成部分,IEEE802.1Qav提出了基于信用的整形(Credit Based Shaper, CBS)算法,除了BE帧之

外,还有 2 个队列被赋予更高的优先级,根据信用值的增加或减少这 2 个队列进行交替传输<sup>[20]</sup>。例如:当队列中没有数据正在传输时,信用值会增加;当队列中有数据传输时,信用值会降低;当对列中数据传输完成时,信用值清零<sup>[21]</sup>。因此,可以用于解决高优先级空闲下的低优先级数据传输问题。

CBS 通常与流预留协议 (Stream Reserved Protocol, SRP) 结合使用,可将每个桥的延迟限制在 250  $\mu\text{s}$  以下。IEEE 802.1Qav 以太网 AVB 标准能够在虚拟局域网以太网 7 跳范围内,保证 A 类的最差情况下延迟低于 2 ms, B 类低于 50 ms<sup>[22]</sup>。

数据整形调度算法主要包括以上严格优先级算法、基于信用值整形算法、门控调度算法等 3 种算法。目前,在对 3 种算法的使用上主要采用独立使用的原则,而单一的算法在处理低优先级的非恒定速率流时,会影响高优先级流的传送,即使应用当前影响最小的帧抢占调度算法,其端到端的抖动仍可能处于较高的状态,不利于恒定速率流的稳定送达。

### 3 基于整形调度的混合业务流网络传输机制

面向无人战车车载武器平台承载的载荷控制类、传感采集类和模块交互类融合业务流共网传输需求,基于时间敏感网络的车载实时以太网的网络

传输过程从时间敏感网络的网络体系结构出发,依靠网络控制器的集中管控功能,对不同传输特性需求的业务流进行综合调度。通过定义流量整形器,实现对高优先级业务流传输质量的保障,构建严格优先级、时间感知整形机制和基于信用的整形机制,实现融合业务流的分类入队。当融合业务流通过同一发送网口发送时,不同类别的流量可以使用不同的机制传输。以此为基础,基于时分多路复用和离散时隙分布的思想,设计多平面交换架构和内部优先级值 (Internal Priority Value, IPV) 输出调度机制,在确保时间敏感业务流报文延时确定可控的同时,可实现非时间敏感业务报文的尽力转发。

基于时间敏感网络的无人战车实时以太网的每个输入接口对到达的帧进行处理和分类后,将交换的 ST 帧、RC 帧、BE 帧分别送到 3 个不同的交换平面处理,如图 2 所示。每个交换平面确定发送数据帧的输出接口,并根据帧的输出接口将其发送到不同的输出模块。每个输出模块设置不同队列,分别保存从各交换平面到达的数据帧,然后根据时间敏感网络调度机制,调度不同队列中的数据帧从输出链路发送。每个接口需要维护 8 个队列,其优先级从高到底的顺序为  $Q7, Q6, Q5, Q4, Q3, Q2, Q0, Q1$  ( $Q0$  的优先级高于  $Q1$ )。

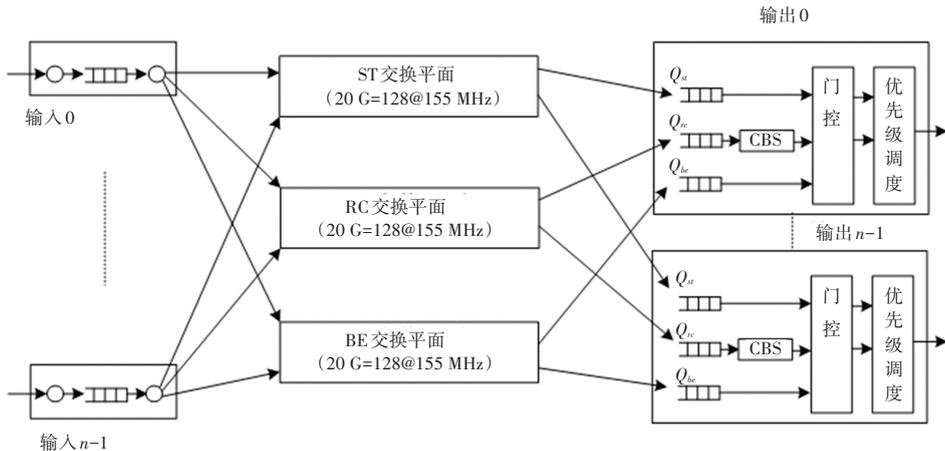


图 2 多平面交换内部示意图

Fig. 2 Internal schematic diagram of multi plane exchange

#### 3.1 输出队列定义

$Q7$ : 高优先级 ST 流队列;  $Q6$ : 高优先级 ST 流队列;  $Q5$ : 低优先级 ST 流队列;  $Q4$ : 低优先级 ST 流队列;  $Q3$ : 高优先级 BE 队列 (EMP 帧、PTP 帧、ARP 帧、ICMP 帧);  $Q2$ : 高优先级 RC 流队列;  $Q0$ : 低优先级 RC 流队列;  $Q1$ : 低优先级 BE 队列 (属于 BE 的 IP 分组)。

#### 3.2 基于 IPV 的入队控制

每个帧在到达输出端口时,都要先计算得到内

部优先级 (IPV) 值,然后根据 IPV 值决定进入的队列。例如:IPV 等于 7 表示进入  $Q7$ ,IPV 等于 0 表示进入  $Q0$ 。

#### 3.3 输出

基于混合业务流的整形调度机制具备高速应用数据的混合传输能力 (如图 3 所示),实现基于数据帧优先级、信用和时间周期的流量调度和混合调度。

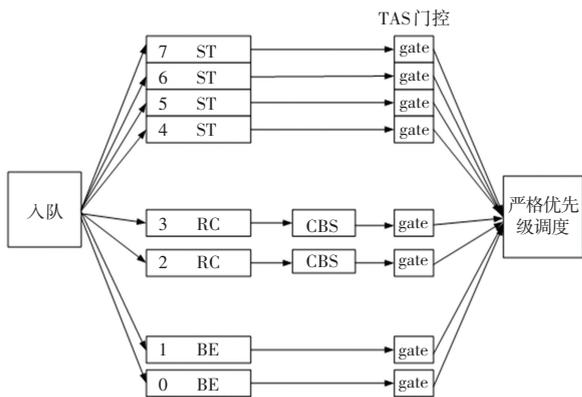


图3 多种机制混合调度

Fig. 3 Mixed scheduling with multiple mechanisms

### 4 结果与分析

基于 vivado 和 modelsim 实现上述机制的设计与仿真。测试案例如图 4 所示:循环发送 10 次,每次发送 1 个长度为 64 字节的 ST 流,10 个长度为 64 字节的 BE 流和 1 个长度为 1 514字节的 RC 流。

```

@ (posedge user_clk);
repeat(10) begin
    st_fwd_test(32'd1,12'd64,16'h8000,16'd1,0);
    be_fwd_test(32'd10,12'd64,16'd1,0);
    rc_fwd_test(32'd1,12'd1514,16'd1,0);
end

```

图4 多业务流的混合调度测试案例

Fig. 4 A mixed scheduling test case for multiple business flows

ST 流、BE 流和 RC 流混合发送的仿真结果如图 5 所示,可以看到这 3 种业务流在共网传输。

```

# Send Pkt Sum:      1 Len: 64
# Time:              30685 ST Fwd_0 Test Done
# Time:              30685 BE Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:     10 Len: 64
# Time:              31085 BE Fwd_0 Test Done
# Time:              31085 RC Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len:1514
# Time:              31853 RC Fwd_0 Test Done
# Time:              31853 ST Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len: 64
# Time:              31893 ST Fwd_0 Test Done
# Time:              31893 BE Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:     10 Len: 64
# Time:              32293 BE Fwd_0 Test Done
# Time:              32293 RC Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len:1514
# Time:              33061 RC Fwd_0 Test Done
# Time:              33061 ST Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len: 64
# Time:              33101 ST Fwd_0 Test Done
# Time:              33101 BE Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:     10 Len: 64
# Time:              33501 BE Fwd_0 Test Done
# Time:              33501 RC Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len:1514
# Time:              34269 RC Fwd_0 Test Done
# Time:              34269 ST Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:      1 Len: 64
# Time:              34309 ST Fwd_0 Test Done
# Time:              34309 BE Fwd_0 Testing
# Send Pkt Sum:     10 Len: 64
# Time:              34709 BE Fwd_0 Test Done

```

图5 多业务流的混合调度结果

Fig. 5 Mixed scheduling results for multiple business flows

研究中构建了网络拓扑如图 6 所示,经过车载实时以太网交换机发送 ST 流、RC 流和 BE 流的混合流量。ST 流的配置如图 7 所示,发送 10 000 个报文大小为 256 字节的 ST 帧;RC 流的配置如图 8 所示,发送 10 000 个报文大小为 256 字节的 RC 帧;BE 流的配置如图 9 所示,发送 10 000 个报文大小为 256 字节的 BE 帧。

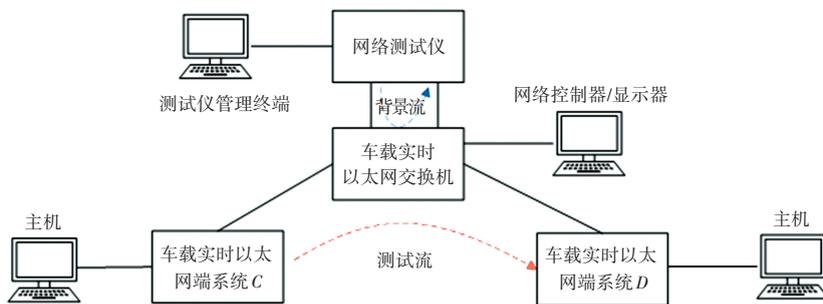


图6 混合调度能力试验—试验场景示意图

Fig. 6 Mixed scheduling capability test – schematic diagram of the test scenario

流量特征信息			
周期	1000000	最大报文大小	256
周期内发送报文数	1	最早发送时间	0
最晚发送时间	0	报文个数	10000
流ID	0		

图7 ST 配置

Fig. 7 ST configuration

流量特征信息			
周期	8000	最大报文大小	256
周期内发送报文数	1	最早发送时间	0
最晚发送时间	0	报文个数	10000
流ID	1		

图 8 RC 配置

Fig. 8 RC configuration

流量特征信息			
周期	4000	最大报文大小	256
周期内发送报文数	1	最早发送时间	0
最晚发送时间	0	报文个数	10000
流ID	2		

图 9 BE 配置

Fig. 9 BE configuration

经过测试仪发送以上配置的混合流量的测试结果如图 10~12 所示。发送的 ST 流报文数和接收的 ST 流报文数均为 10 000 个,最大时延 327  $\mu$ s 232 ns,抖动 12  $\mu$ s 352 ns;发送的 RC 流报文数和接收的

RC 报文数均为 10 000 个,带宽 256.033 Mbps;发送的 BE 流报文数和接收的 BE 报文数都是 10 000 个。

流量基本情况			
流ID	0	五元组	192.168.1.1:121=>192.168.1.2:121
流量时长	9s 998ms 987us 704ns	平均吞吐量	2.048 Mbps
发送报文数	10000	接受报文数	10000
最大延时	327us 232ns	最小延时	314us 880ns
平均延时	320us 11ns	中位数延时	320us 24ns
抖动	12us 352ns		

图 10 ST 流测试结果

Fig. 10 ST test results

流ID	0	五元组	192.168.1.1:122=>192.168.1.3:122
流量时长	79ms 989us 760ns	平均吞吐量	256.033 Mbps
发送报文数	10000	接受报文数	10000

图 11 RC 流测试结果

Fig. 11 RC test results

流量基本情况			
流ID	0	五元组	192.168.1.1:100=>192.168.1.4:100
流量时长	39ms 991us 992ns	平均吞吐量	512.103 Mbps
发送报文数	10000	接受报文数	10000

图 12 BE 流测试结果

Fig. 12 BE test results

通过以上实验可以看出,发送的 ST、RC 和 BE 混合流,经过交换机后端系统接收到的数量与发送

的数量相等,说明丢包率为 0,实现了 3 种流在同一网络中的混合传输。

## 5 结束语

通过调研无人战车中混合流量传输的确定性时延需求,分析时间敏感网络提出的流量调度整形算法,提出将严格优先级调度算法、基于信用的调度算法和基于门控的调度算法这3种调度算法混合使用,实现无人战车的混合业务流网络传输。在保证时间敏感流传输的同时,实现非时间敏感流数据的尽力传输。但是这只是实现了在实验室内的研究,外部干扰较小,且组网相对比较简单,将来需要进行复杂组网的实验,根据结果做进一步的优化与改进。同时,还需要将其配备到无人战车中去,根据实际的环境进行更为深入的探讨与研究。

## 参考文献

- [1] 侯典宁,董志成. 城市巷战无人化装备运用分析[J]. 舰船电子工程,2023,43(8):27-30.
- [2] 郑博文,辛学敏. 无人战车的发展需求及研究意义[J]. 山东工业技术,2018(17):144.
- [3] 李良斐,张银平. 车载网络技术现状及对比分析[J]. 农机使用与维修,2022(8):84-86.
- [4] 周震. 确定性网络调度机制研究及实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.
- [5] 王朴野. 时间敏感网络中调度算法的研究与仿真[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [6] 任杰. 时间敏感网络混合流按需调度技术研究及实现[D]. 北京:北京交通大学,2022.
- [7] ZHAO Luxi, POP P, ZHENG Zhong, et al. Timing Analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus[C]//IEEE Real - Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Porto, Portugal ;IEEE, 2018:25-36.
- [8] ZHAO Luxi, POP P, ZHENG Zhong, et al. Latency Analysis of multiple classes of AVB traffic in TSN with standard credit

- behavior using network calculus [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021,68(10):10291-10302.
- [9] 李良斐,张银平. 车载网络技术现状及对比分析[J]. 农机使用与维修,2022(8):84-86.
- [10] 高惠民. 汽车电子电气架构的“前世、今生和未来”(二)[J]. 汽车维修与保养,2023(8):57-61.
- [11] 赵晓敏,王腾,李宗辉,等. 下一代车载时间敏感网络架构设计与调度评估[J]. 电讯技术,2023,63(1):77-84.
- [12] 韩文璇. 时间敏感网络中混合流量调度算法的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2023.
- [13] 杨浩,秦贵和,于赫,等. 车载时间敏感网络技术综述[J]. 计算机应用与软件,2015,32(8):1-5,10.
- [14] 黄韬,鲁京京,朱海龙,等. 车载时间敏感网络:现状与展望[J]. 北京邮电大学学报,2023,46(6):46-54.
- [15] ZHOU Zifan, LEE J, BERGER M S, et al. Simulating TSN traffic scheduling and shaping for future automotive Ethernet[J]. Journal of Communications and Networks, 2021, 23(1):53-62.
- [16] 纪贺. 时间敏感网络中调度机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
- [17] CRACIUNAS S S, OLIVER R S, MARTIN M, et al. Scheduling real - time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks [ C ]// IEEE International Conference on Real - Time Networks and Systems ( RTNS ). New York, USA : ACM, 2016 : 183-192.
- [18] OLIVER R S, CRACIUNAS S S, STEINER W. IEEE 802.1Qbv gate control list synthesis using array theory encoding [ C ]// 2018 IEEE Real - Time and Embedded Technology and Applications Symposium ( RTAS ). Porto, Portugal ;IEEE, 2018 : 13-24.
- [19] 晏先春. 基于门控整形的时间敏感网络调度算法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2022.
- [20] MOHAMMADPOUR E, STAI E, BOUDEDEC J Y L. Improved credit bounds for the credit - based shaper in time - sensitive networking [ J ]. IEEE Networking Letters, 2019, 1(3):136-139.
- [21] 赵洋. 基于信用量整形的流控机制实现与验证研究[D]. 天津:河北工业大学,2021.
- [22] 李二帅,何锋,熊华钢. AVB网络流量整形帧模型端到端延迟计算[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7):1442-1449.