http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0908

航空电子 AFDX 与 AVB 传输实时性抗干扰对比

赵琳，何锋*，熊华钢

（北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100083）

摘 要：为满足未来航电系统音视频信息传输的需求，考虑车载嵌入式系统的候选实时多媒体网络 AVB 在航电环境中的应用，并对 AVB 与 AFDX 的传输进行了对比研究。首先构建 AVB 与 AFDX 标准对比；其次提出基于网络演算的 AVB 和 AFDX 端到端延迟计算方法；然后通过定义不同的消息传输场景，采用理论方法分析消息传输实时性的干扰要素；最后利用仿真方法予以验证。在典型1 000 条虚拟链路的组网规模下，结果显示：AFDX 高优先级流量的端到端延迟优于 AVB，对于低优先级流量端到端延迟，则 AVB 和 AFDX 各有优劣；但受突发的流量影响，在增加 50 条各 0.22 Mbit/s 带宽的低优先级流量干扰情况下，高优先级流量平均端到端延迟的变化率在 AVB 中为 0.25%，在 AFDX 中为 0.38%；在增加 50 条各 0.22 Mbit/s 带宽的高优先级流量干扰情况下，低优先级流量平均端到端延迟的变化率在 AVB 中为5.17%，在 AFDX 中为 10.25%。结果表明：时间敏感消息在 AVB 网络中传输实时性的抗干扰能力优于 AFDX。

关 键 词：航空电子网络；音视频桥接（AVB）网络；航空电子全双工交换以太网（AFDX）；实时性；抗干扰

中图分类号：V247；TP393

文献标识码：A **文章编号**：1001-5965(2017)12-2359-11

航空电子全双工交换以太网（Avionics Full-Duplex switched Ethernet，AFDX）是由 ARINC 664 Part 7[1]规范定义的一种确定性网络，用以保障数据传输的延迟与抖动上限，已经成功运用于空客 A380 和波音 787 飞机上，成为新一代大型客机的主干交换网络。随着分布式综合模块化航空电子（Distributed Integrated Modular Avionics，DIMA）的发展，航电网络需要提供高质量、低延迟、时间同步的消息传输[2]。

IEEE 802.1 音视频桥接（Audio/Video Bridging，AVB）网络在传统以太网的基础上提供了时间同步和低延迟的音视频流服务[3]，现已成为车载组网的首选[4-6]。机载电子设备的增多带来了信息的爆炸，飞行员利用传感器视频数据了解空中态势，通过语音控制简化设备操作，完成报告、提示、告警等任务[7]。航电网络中包含了大量的控制信号、音视频信号等。因此，研究者开始探讨 AVB 在航电环境中的应用，如航电环境的娱乐域。文献[8]评估了多种消息调度算法，将传统的严格优先级排队（Strict Priority Queuing，SPQ）算法、加权平均排队（Weighted Fair Queuing，WFQ）算法等与 AVB 基于信用的流量整形（Credit Based Shaping，CBS）算法做比较，研究表明，CBS 算法有望成为航电混合流量的实时算法；文献[9]认为使用带有时钟同步的 AVB 网络可以满足航电网络的确定性需求；文献[10-13]在

收稿日期：2016-12-01；**录用日期**：2017-02-24；**网络出版时间**：2017-04-11 18:16
网络出版地址：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170411.1816.002.html
基金项目：国家自然科学基金（61301086）；中央高校基本科研业务费专项资金（YWF-15-GJSYS-055）
* **通讯作者**：E-mail：robinleo@buaa.edu.cn

引用格式：*赵琳，何锋，熊华钢. 航空电子 AFDX 与 AVB 传输实时性抗干扰对比[J]. 北京航空航天大学学报，2017，43(12)：2359-2369. ZHAO L，HE F，XIONG H G. Comparison of real-time anti-jamming transmission for avionics AFDX and AVB[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2017，43(12)：2359-2369 (in Chinese).*

AVB 网络中增加时间触发消息,确保航电网络中具备严格定时应用的需求。

现有研究大多是探讨 AVB 中的某一个协议或算法(例如 CBS)在航电网络中的应用可行性,缺乏 AVB 与代表性航电网络的整体性能评估。为此,本文将 AVB 网络与 AFDX 网络作对比,探讨 2 种网络中同优先级流量的端到端延迟,分析消息在 2 种网络中的传输实时性抗干扰能力,并利用仿真实验进行验证。

1 协议对比分析

1.1 AFDX 网络

AFDX 网络可以包含对时间敏感的航空流和传统以太网尽力传(Best Effort,BE)流。其中,对时间敏感的航空流定义了 2 个优先级(高优先级和低优先级)。借助于混合优先级流量的综合方法,可以考虑时间敏感的航空流的优先级大于 BE 流,在调度过程中,流量遵循先进先出 SPQ 规则,如图 1 所示。

AFDX采用虚拟链路(Virtual Link,VL)机制实现数据的逻辑隔离[1]。VL 是从一个源端到一个或多个目的端之间的单向逻辑路径。每条 VL 的最大使用逻辑带宽 C_{AFDX} 由带宽分配间隔 BAG 和最大帧长 $S_{\max}$ 决定,即

$$C_{\mathrm{AFDX}} = S_{\max}/\mathrm{BAG} \tag{1}$$

式中:$S_{\max}$ 为物理链路上考虑帧间间隔后的长度;BAG 为同一条 VL 前后 2 个数据包之间的最小时间间隔。通过限制分组的发送间隔,可以控制终端最坏情形的排队延迟界限,源端最大抖动不得超过 500 μs[1]。

AFDX 交换机采用信用量令牌桶管制算法控制数据包的时延抖动。初始时,信用量设置为

$$\mathrm{Credit}_{\mathrm{AFDX}} = S_{\max,i}(1 + J_{i,\mathrm{switch}}/\mathrm{BAG}_i)$$

式中:$S_{\max,i}$ 为 VL_i 的最大帧长;$J_{i,\mathrm{switch}}$ 为交换机抖动配置。随时间的推移,信用量以 $S_{\max,i}/\mathrm{BAG}_i$ 比率增长,但最大不超过 $S_{\max,i}(1 + J_{i,\mathrm{switch}}/\mathrm{BAG}_i)$。在采用基于帧的流量管制算法中,每成功发送一个数据帧,信用量减少 $S_{\max,i}$。当当前信用量不够转发时,则数据帧必须等待信用量增长到足够值才能被发送。

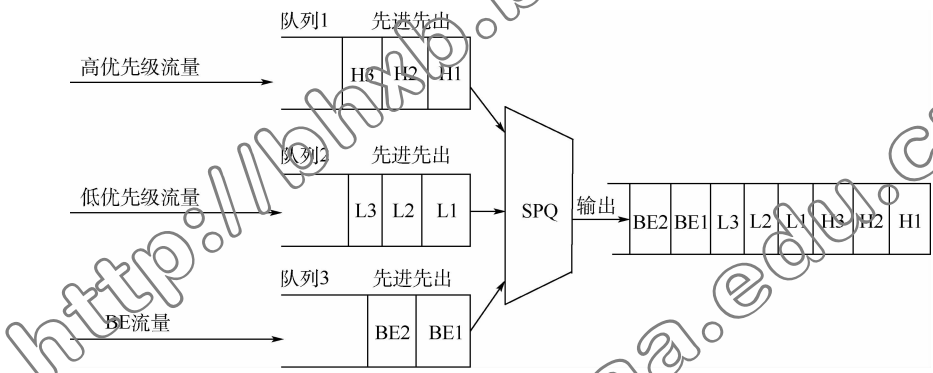


图 1 AFDX 流量调度机制

Fig. 1 Traffic scheduling mechanism in AFDX

1.2 AVB 网络

典型 AVB 网络包含时间敏感的 AVB 音视频流和 BE 流。为解决流量之间的竞争问题,IEEE 802.1 工作组定义 IEEE 802.1Qat-AVB 流预定协议(Stream Reservation Protocol,SRP)[14]。协议推荐将 75% 的带宽资源分配给 AVB 音视频流,25% 的带宽资源分配给 BE 流。当源端(talker)有音视频流向目的端(listener)发送时,需要声明此数据流的带宽需求。协议为音视频流从源端到目的端的整个路径预留出所需的带宽资源,带宽允许则建立音视频流连接,否则连接失败。带宽预留涉及 3 个参数:数据包长度(packetLength)、数据包发送频率(serviceRate)和数据包密度(MIF,代表一个周期内发送的帧的个数),如式(2)所示:

$$C_{\mathrm{AVB}} = \frac{(\mathrm{packetLength} + 20) \times 8 \times \mathrm{MIF}}{\mathrm{serviceRate}} \tag{2}$$

式中:C_{AVB} 为 AVB 音视频流量带宽;packetLength 为逻辑帧长;20 表示以太网帧的起始定界符、前导码和帧间间隔共 20 Byte。

此外,SRP 协议将 AVB 音视频流划分为 2 类:SR_A 类和 SR_B 类。2 类音视频流标准参数如表 1 所示。

为了实现上述不同数据流的调度,IEEE 802.1研究组定义 IEEE 802.1Qav-AVB 转发队列协议[15]。AVB 音视频流采用基于信用的 CBS 算法进行整形,之后与 BE 队列按照 SPQ 规则实现流调度输出,音视频流优先级高于 BE 流优先级,

http://bhxb.buaa.edu.cn

为此确保高优先级流量不会被低优先级流量抢占。调度过程如图 2 所示。

依据 CBS 算法,SR_A 和 SR_B 数据帧在传输过程中依赖 2 个带宽保障参数:空闲率(idleSlope$_X$)和发送率(sendSlope$_X$),X 表示 SR_A 类或 SR_B类。假设 R_A、R_B 分别为 SR_A、SR_B 的预留速率,R_0 为链路传输速率,则

$$\begin{cases} R_A = \text{idleSlope}_A \\ R_B = \text{idleSlope}_B \end{cases}$$

sendSlope$_X$ 与 idleSlope$_X$ 的关系为

$$\text{sendSlope}_X = \text{idleSlope}_X - R_0$$

CBS 算法整形过程如图 3 所示。

SR 数据帧在传输过程中分别与各自的信用量关联。每个类可通过各自信用量上下限(hiCredit$_X$、loCredit$_X$)控制流突发度。当 SR 数据帧已经在缓存队列中准备好,但此时已有低优先级帧正在占用交换机端口时,信用量依据空闲率递增;当链路空闲且信用量不小于 0 时,SR 数据帧予以发送,此时信用量依据发送率递减;如果队列中没有相应的 SR 数据帧需要传输时,若信用量大于 0,则重置为 0,否则按照空闲率增长到 0。

表 1　SR_A 类和 SR_B 类参数

Table 1　Parameters of SR_A and SR_B

类型	优先级	最大帧长/Byte	发送频率/μs	7 跳最大延迟/ms	最大抖动/μs
SR_A	高	1 171	125	2	125
SR_B	低	1 500	250	50	1 000

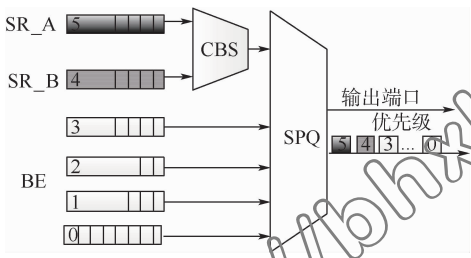


图 2　AVB 流量调度机制

Fig. 2　Traffic scheduling mechanism in AVB

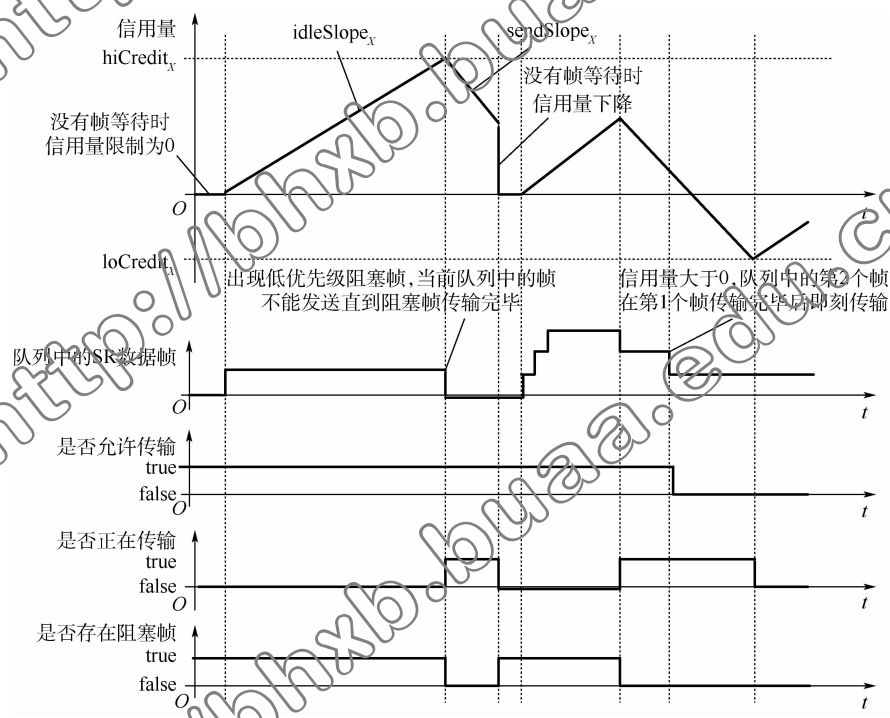


图 3　CBS 算法

Fig. 3　CBS algorithm

1.3　分析结果

结合 1.1 节、1.2 节分析可知,对于 AFDX 高优先级流,在排队过程中允许占用网络的全部带宽进行传输,而 AVB 网络由于受限于 CBS 整形,只有当信用值不小于 0 时,SR_A 才允许发送,信用量的恢复过程会导致延迟的增加,因此,AFDX 中的高优先级流延迟应小于 AVB 中 SR_A 类流延迟;AFDX 低优先级流延迟与 AVB 中 SR_B 类流延迟对比呈现不确定性:一方面低优先级流可能受益于高优先级流的整形使得延迟得到优化,另一方面也可能由于自身信用量的整形导致延迟的增加;对于 BE 流延迟,理论上 AVB 网络会好于 AFDX 网络,因为 AVB 中的 SRP 协议推荐将 25% 的带宽预留给 BE 流,而 AFDX 网络无此预留机制,BE 流只有等待高低优先级流传输完毕,才能利用剩余带宽发送。

http://bhxb.buaa.edu.cn

2 性能对比分析

2.1 AFDX 网络

有研究者[16-19]考虑用到达曲线来约束流量累积输入函数在时间 t 内输入流的总比特数,用服务曲线反映流在网络节点中的输出能力。到达曲线与服务曲线之间的最大水平偏移为端到端最坏延迟。

一种典型的到达曲线如式(3)所示,被称为漏桶到达曲线。

$$\alpha_i(t) = \sigma_i + \rho_i t \tag{3}$$

式中:σ_i 为流的最大突发;ρ_i 为流的持续速率。

AFDX 中每条 VL 的到达曲线均可表示为 $\alpha_i(t)$[20]。其中,$\sigma_i = S_{\max,i}$,$\rho_i = S_{\max,i}/\mathrm{BAG}_i$。考虑到 AFDX 不同物理链路上的多条流量汇聚情况,下面对式(3)进行匹配和适应性改进。

当 n 条 VL 复用同一物理链路经过交换机某一输出端口时,基本网络演算将这 n 条 VL 的到达曲线简单相加,作为总的到达曲线 $\tilde{\alpha}(t)$。

$$\tilde{\alpha}(t) = \sum_{i=1}^{n}\sigma_i + \sum_{i=1}^{n}\rho_i t$$

由于同一链路上的 n 条 VL 不可能同时到达交换机同一缓存输出端,且受限于端口带宽 C,文献[21]提出采用分组网络演算,对应的到达曲线为 $\tilde{\alpha}'(t)$。

$$\tilde{\alpha}'(t) = \min\left\{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i + \sum_{i=1}^{n}\rho_i t, \max\{\sigma_i\} + Ct\right\}$$

当流量经由不同的物理链路 $L_v(v=1,2,\cdots,m)$ 输入到交换机同一输出缓存队列时,利用分组网络演算得到的聚合到达曲线为

$$\hat{\alpha}(t) = \sum_{v=1}^{m}\tilde{\alpha}'(t)^{L_v} = \sum_{v=1}^{m}\left(\min\left\{\sum_{i\in L_v}\sigma_i + \sum_{i\in L_v}\rho_i t, \max_{i\in L_v}\{\sigma_i\} + Ct\right\}\right) \tag{4}$$

曲线是一个具有 λ 个拐点($0\leqslant\lambda\leqslant m$)的递增分段线性凸函数,如图 4(b)所示。与图 4(a)基本网络演算相比,分组网络演算能获得更紧的端到端最坏延迟。

利用阶跃函数将 $\tilde{\alpha}'(t)^{L_v}$ 改写为

$$\tilde{\alpha}'(t)^{L_v} = \sum_{\varepsilon=0}^{\lambda}(\sigma^{L_v} + \rho^{L_v}t)(u(t-e_\varepsilon) - u(t-e_{\varepsilon+1}))$$

式中:

$$\sigma^{L_v} = \begin{cases}\sum\limits_{i\in L_v}\sigma_i & e_\lambda \geqslant e_{L_v}\\ \max\limits_{i\in L_v}\{\sigma_i\} & e_\lambda < e_{L_v}\end{cases}$$

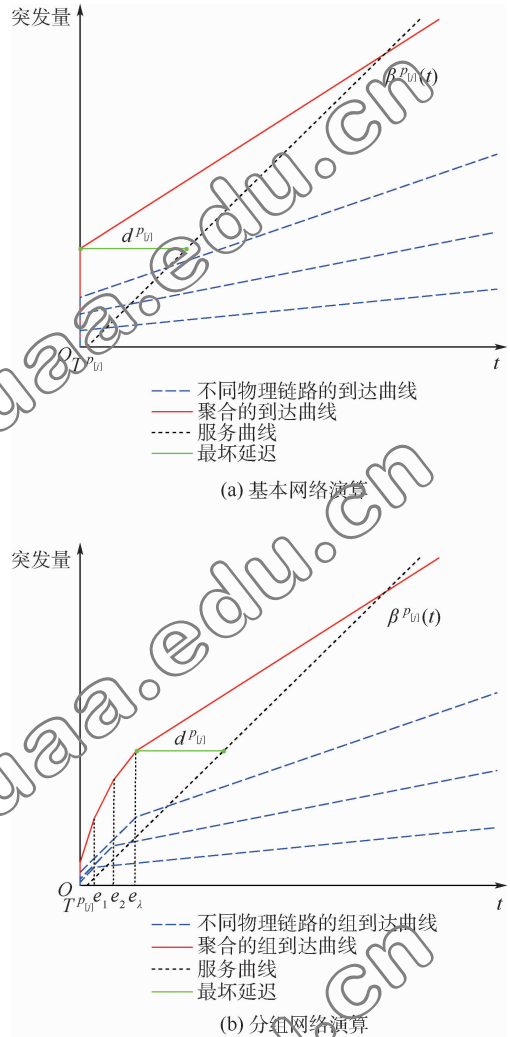


图 4 网络演算模型对比

Fig. 4 Comparison of network calculus models

$$\rho^{L_v} = \begin{cases}\sum\limits_{i\in L_v}\rho_i & e_\lambda \geqslant e_{L_v}\\ 0 & e_\lambda < e_{L_v}\end{cases}$$

$$u(t) = \begin{cases}1 & t\geqslant 0\\ 0 & t<0\end{cases}$$

$$e_\lambda = \frac{\sum\limits_{i\in L_v}\sigma_i - \max\limits_{i\in L_v}\{\sigma_i\}}{C - \sum\limits_{i\in L_v}\rho_i}$$

代入式(4)可得

$$\hat{\alpha}(t) = \sum_{v=1}^{m}\tilde{\alpha}'(t)^{L_v} = \sum_{\varepsilon=0}^{\lambda}\left(\sum_{v=1}^{m}\sigma^{L_v} + \sum_{v=1}^{m}\rho^{L_v}t\right)\cdot(u(t-e_\varepsilon) - u(t-e_{\varepsilon+1})) = \sum_{\varepsilon=0}^{\lambda}(\hat{\sigma}_{(\varepsilon)} + \hat{\rho}_{(\varepsilon)}t)(u(t-e_\varepsilon) - u(t-e_{\varepsilon+1})) \tag{5}$$

一种广泛应用的服务曲线如式(6)所示,被称为速率延迟服务曲线[15]。

$$\beta_i(t) = R_i(t-T_i)^+ \tag{6}$$

式中:R_i 为流的服务速率;T_i 为流的服务延迟;

http://bhxb.buaa.edu.cn

"$[x]^+$"表示 $x\geqslant 0$ 时,值等于 x,否则值等于 0。考虑到不同优先级流在 AFDX 中的调度规则,对式(6)进行匹配和适应性改进。

由于 AFDX 采用先进先出 SPQ 规则,设 $p_{[j]}$ 为队列的优先级($0\leqslant j\leqslant \max$),$j$ 的值越大优先级越高,服务曲线 $\beta^{p[j]}(t)$ 及相应参数应满足:

$$\beta^{p[j]}(t)=R^{p[j]}(t-T^{p[j]})^+ \qquad 0\leqslant j\leqslant \max$$

$$R^{p[j]}=\begin{cases} C & j=\max \\ C-\sum_{k=j+1}^{j_{\max}}\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[k]} & j<\max \end{cases}$$

$$T^{p[j]}=\delta^{\text{hold},p[j]}+\delta^{\text{burst},p[j]}$$

式中:$\delta^{\text{hold},p[j]}$ 为低优先级流引起的持续延迟;$\delta^{\text{burst},p[j]}$ 为高优先级流引起的突发延迟[22]

$$\delta^{\text{hold},p[j]}=\begin{cases} 0 & j=0 \\ \dfrac{\max\{L_{\max}^{p[l]}\}}{C},l<j & \text{其他} \end{cases}$$

$$\delta^{\text{burst},p[j]}=\begin{cases} 0 & j=j_{\max} \\ \dfrac{\sum_{k=j+1}^{j_{\max}}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{p[k]}}{C-\sum_{k=j+1}^{j_{\max}}\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[k]}} & \text{其他} \end{cases}$$

式中:$L_{\max}^{p[l]}$ 为优先级为 l 的流的最大帧长。

到达曲线 $\hat{\alpha}(t)$ 和服务曲线 $\beta^{p[j]}(t)$ 之间的最大水平偏移 $d^{p[j]}$ 为 AFDX 端到端最坏延迟,如图 4(b)所示。

$$d^{p[j]}=(T^{p[j]}-e_\lambda)+\left[\hat{\sigma}_{(0)}+\sum_{\varepsilon=0}^{\lambda-1}\hat{\rho}_{(\varepsilon)}(e_{\varepsilon+1}-e_\varepsilon)\right]\Big/R^{p[j]}$$

设 $A=\hat{\sigma}_{(0)}+\sum_{\varepsilon=0}^{\lambda-1}\hat{\rho}_{(\varepsilon)}(e_{\varepsilon+1}-e_\varepsilon)$,则

$$d^{p[j]}=(T^{p[j]}-e_\lambda)+A/R^{p[j]} \tag{7}$$

为了分析消息在 AFDX 中传输实时性的抗干扰能力,设置 2 个传输场景进行讨论,对时间敏感的 AFDX 高、低优先级流的端到端延迟干扰要素进行分析。

1)场景 1。在 AFDX 网络中,假设某发送端向某接收端发送 BE 流和 AFDX 低优先级流,$p_{[0]}$ 和 $p_{[1]}$ 分别为 BE 流和 AFDX 低优先级流的优先级,计算可得

$$T^{p[1]}=\delta^{\text{hold},p[1]}+\delta^{\text{burst},p[1]}=\frac{\max\{L_{\max}^{p[0]}\}}{C}+0=\frac{\max\{L_{\max}^{p[0]}\}}{C}$$

$$d^{p[1]}=(T^{p[1]}-e_\lambda)+A/R^{p[1]}=\left(\frac{\max\{L_{\max}^{p[0]}\}}{C}-e_\lambda\right)+\frac{A}{C} \tag{8}$$

2)场景 2。在 AFDX 网络中,假设某发送端向某接收端发送 BE 流、AFDX 低优先级流和高优先级流,$p_{[0]}$、$p_{[1]}$ 和 $p_{[2]}$ 分别为 BE 流、AFDX 低优先级流和高优先级流的优先级,计算可得

$$\overline{T}^{p[1]}=\overline{\delta}^{\text{hold},p[1]}+\overline{\delta}^{\text{burst},p[1]}=\frac{\max\{L_{\max}^{p[0]}\}+\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{p[2]}}{C-\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[2]}}$$

$$\overline{d}^{p[1]}=(\overline{T}^{p[1]}-e_\lambda)+A/\overline{R}^{p[1]}=\left(\frac{\max\{L_{\max}^{p[0]}\}}{C}+\frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{p[2]}}{C-\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[2]}}-e_\lambda\right)+\frac{A}{C-\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[2]}} \tag{9}$$

场景 1、2 中 AFDX 低优先级流的端到端延迟的变化量 Δd_{L} 为

$$\Delta d_{\text{L}}=\overline{d}^{p[1]}-d^{p[1]}=(\overline{T}_i^{p[1]}-T_i^{p[1]})+\frac{A}{C-\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[2]}}-\frac{A}{C}\geqslant\overline{T}_i^{p[1]}-T_i^{p[1]}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^{p[2]}}{C-\sum_{i=1}^{n}\rho_i^{p[2]}} \tag{10}$$

在场景 2 中,对于 AFDX 高优先级流而言,令 $L_{\max}^{\text{I}}=\max\{L_{\max}^{p[0]},L_{\max}^{p[1]}\}$,则有

$$T^{p[2]}=\delta^{\text{hold},p[2]}+\delta^{\text{burst},p[2]}\geqslant\frac{L_{\max}^{\text{I}}}{C}$$

当接纳突发的 BE 流或 AFDX 低优先级流时,

$$\overline{T}^{p[2]}=\overline{\delta}^{\text{hold},p[2]}+\overline{\delta}^{\text{burst},p[2]}=\frac{\overline{L}_{\max}^{\text{I}}}{C}$$

式中:$\overline{L}_{\max}^{\text{I}}=\max\{\overline{L}_{\max}^{p[0]},\overline{L}_{\max}^{p[1]}\}$。令 $\Delta L_{\max}=\overline{L}_{\max}^{\text{I}}-L_{\max}^{\text{I}}$,则 AFDX 高优先级流的端到端延迟的变化量 Δd_{H} 为

$$\Delta d_{\text{H}}=\overline{d}^{p[2]}-d^{p[2]}=\frac{\Delta L_{\max}}{C} \tag{11}$$

可见,AFDX 网络中同一接收端突发的高优先级流对低优先级流端到端延迟的影响不仅取决于高优先级流的帧长,还取决于高优先级流的传输速率;突发的 BE 流或 AFDX 低优先级流对高优先级流端到端延迟的影响取决于突发前后 BE 流或 AFDX 低优先级流一个最大帧的帧长的差值。

2.2　AVB 网络

为了使流量在 AVB 和 AFDX 中的行为具有可对比性,考虑 AVB 中流量的到达曲线为 $\alpha(t)_{\text{AVB}}$,如式(12)所示,使其满足最小发送间隔

http://bhxb.buaa.edu.cn

和最大突发度的约束机制,这一机制典型地符合周期性消息发送模型。

$$\alpha(t)_{\mathrm{AVB}}=\min\left\{\sum_{i=1}^{n}b_i+\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot t,\max\{b_i\}+R_0t\right\} \tag{12}$$

式中:b_i 和 r_i 分别为音视频流的最大突发和持续速率。大括号中两曲线交点的横坐标设为 τ。

AVB 交换机服务曲线定义为:$\beta^X(t)=\mathrm{idleSlope}_X(t-T^X)^+$,$T^X=\delta^{\mathrm{hold},X}+\delta^{\mathrm{burst},X}$,$\mathrm{idleSlope}_X$ 和 T^X 分别为 X 类音视频流的服务速率和服务延迟。

到达曲线和服务曲线之间的最大水平偏移 d^X 为 AVB 端到端最坏延迟,即

$$d^X=(T^X-\tau)+\frac{\sum_{i=1}^{n}b_i+\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot\tau}{\mathrm{idleSlope}_X} \tag{13}$$

为了分析消息在 AVB 中传输实时性的抗干扰能力,并且与 AFDX 作对比,同样设置 2 个传输场景进行讨论,对时间敏感的高优先级 SR_A 类流和低优先级 SR_B 类流的端到端延迟干扰要素进行分析。

1)场景 1。在 AVB 网络中,假设某发送端向某接收端发送 BE 帧和 SR_B 类帧,如图 5 所示。

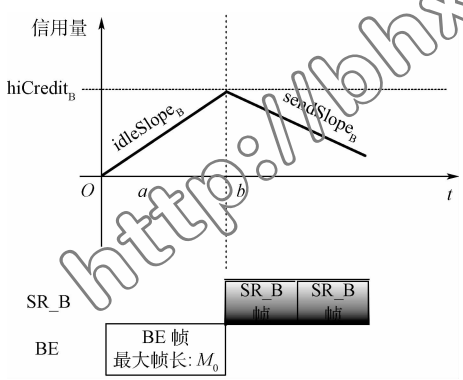


图 5 AVB 中的帧传输模型Ⅰ

Fig. 5 The first model of frame transmission in AVB

此时,SR_B 类帧的服务延迟 T^{B} 为 BE 帧引起的持续延迟,即在 SR_B 类帧允许发送前传输 BE 帧所用的时间 T_{ab}:

$$T^{\mathrm{B}}=\delta^{\mathrm{hold,B}}+\delta^{\mathrm{burst,B}}=T_{ab}+0=M_0/R_0$$

式中:M_0 为 BE 帧的最大帧长。

令 $\mathrm{idleSlope}_{\mathrm{B}}=R_{\mathrm{B}}$,将计算结果代入式(13)得

$$d^{\mathrm{B}}=\left(\frac{M_0}{R_0}-\tau\right)+\frac{\sum_{i=1}^{n}b_i+\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot\tau}{R_{\mathrm{B}}} \tag{14}$$

2)场景 2。在 AVB 网络中,假设某发送端向某接收端发送 BE 帧、SR_A 类帧和 SR_B 类帧,如图 6 所示。

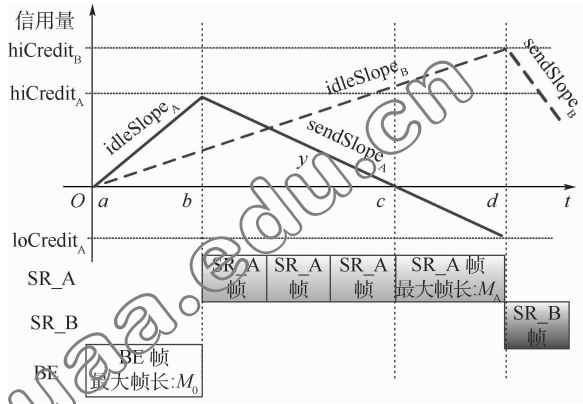


图 6 AVB 中的帧传输模型Ⅱ

Fig. 6 The second model of frame transmission in AVB

此时,SR_B 类帧的服务延迟 T^{B} 为 BE 帧引起的持续延迟和 SR_A 类帧引起的突发延迟之和:

$$\overline{T}^{\mathrm{B}}=\overline{\delta}^{\mathrm{hold,B}}+\overline{\delta}^{\mathrm{burst,B}}=T_{ab}+T_{bd}$$

如图 5 所示,$\overline{\delta}^{\mathrm{hold,B}}=T_{ab}=M_0/R_0$,设曲线 y 的方程为:$y=(R_{\mathrm{A}}-R_0)x+k$,将 b 点坐标(M_0/R_0,M_0R_{A}/R_0)代入方程,求出 $k=M_0$。令 $y=0$ 得 $T_{ad}=M_0/(R_0-R_{\mathrm{A}})$,则

$$\overline{\delta}^{\mathrm{burst,B}}=T_{bd}=M_0/(R_0-R_{\mathrm{A}})-M_0/R_0+M_{\mathrm{A}}/R_0$$

$$\overline{T}^{\mathrm{B}}=\frac{M_0}{R_0-R_{\mathrm{A}}}+\frac{M_{\mathrm{A}}}{R_0}$$

式中:M_{A} 为 SR_A 类帧的最大帧长。

在网络规划设计时,SR_B 类的信用量空闲率 $\mathrm{idleSlope}_{\mathrm{B}}$ 已经配置完成,突发流量接纳过程中值不变,仍为 R_{B}。将上述计算结果代入式(13)得

$$\overline{d}^{\mathrm{B}}=\left(\frac{M_0}{R_0-R_{\mathrm{A}}}+\frac{M_{\mathrm{A}}}{R_0}-\tau\right)+\frac{\sum_{i=1}^{n}b_i+\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot\tau}{R_{\mathrm{B}}} \tag{15}$$

场景 1、2 中 SR_B 类帧的端到端延迟的变化量 Δd_{B} 为

$$\Delta d_{\mathrm{B}}=\overline{d}^{\mathrm{B}}-d^{\mathrm{B}}=\overline{T}^{\mathrm{B}}-T^{\mathrm{B}}=\frac{M_0}{R_0-R_{\mathrm{A}}}+\frac{M_{\mathrm{A}}}{R_0}-\frac{M_0}{R_0}$$

R_{A} 由程序设计者配置,可控,且在最坏情况下 $R_{\mathrm{A}}\ll R_0$,化简上式可得

$$\Delta d_{\mathrm{B}}=\frac{M_{\mathrm{A}}}{R_0} \tag{16}$$

在场景 2 中,对于 SR_A 类帧而言,服务延迟 T^{A} 为一个 BE 或 SR_B 类最大帧引起的持续延迟。令 $M_{\max}=\max\{M_0,M_{\mathrm{B}}\}$,$M_{\mathrm{B}}$ 为 SR_B 类帧的最大帧长,则

$$T^{\mathrm{A}}=\delta^{\mathrm{hold,A}}+\delta^{\mathrm{burst,A}}=T_{ab}+0=\frac{M_{\max}}{R_0}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

当接纳突发的 BE 流或 SR_B 类流时,

$$\overline{T}^{\mathrm{A}} = \overline{\delta}^{\mathrm{hold,A}} + \overline{\delta}^{\mathrm{burst,A}} = T_{ab} + 0 = \frac{\overline{M}_{\max}}{R_0}$$

式中:$\overline{M}_{\max} = \max\{\overline{M}_0, \overline{M}_{\mathrm{B}}\}$。令 $\Delta M_{\max} = \overline{M}_{\max} - M_{\max}$,则 SR_A 类帧的端到端延迟的变化量 Δd_{A} 为

$$\Delta d_{\mathrm{A}} = \overline{d}^{\mathrm{A}} - d^{\mathrm{A}} = \frac{\Delta M_{\max}}{R_0} \tag{17}$$

可见,AVB 网络中同一接收端突发的高优先级 SR_A 类流对低优先级 SR_B 类流延迟的影响主要取决于高优先级 SR_A 类流的最大帧长;突发的 BE 流或 SR_B 类流对高优先级 SR_A 类流延迟的影响主要取决于突发前后 BE 流或 SR_B 类流一个最大帧的帧长差值。

2.3　分析结果

结合 2.1 节、2.2 节推导可知,AVB 中同一接收端突发的高优先级流对低优先级流延迟的影响主要取决于高优先级流的最大帧长,而 AFDX 中同一接收端突发的高优先级流对低优先级流延迟的影响不仅取决于高优先级流的帧长还取决于高优先级的传输速率。当网络带宽相同时,相比较而言,接纳突发的高优先级流时,低优先级流的端到端延迟在 AFDX 中的变化量大于其在 AVB 中的变化量,如式(10)、式(16)所示。

而 AVB 和 AFDX 中突发的 BE 流和低优先级流对高优先级流延迟的影响均取决于突发前后 BE 流或低优先级流的一个最大帧的帧长的差值,如式(11)、式(17)所示,突发的 BE 流或低优先级流对高优先级流的实时性影响较小。

总体而言,时间敏感的消息在 AVB 中传输实时性的抗干扰能力优于 AFDX。

3　仿真模型

本节在 OMNeT + + 平台下构建网络仿真模型,利用仿真实验检验上述理论分析的正确性。

3.1　模型验证

首先选取文献[21]中的简单 AFDX 配置网络对仿真模型进行验证(文献[23-24]也对此模型进行了分析和验证),如图 7 所示,由 7 个端系统 e1 ~ e7 和 3 个交换机 S1 ~ S3 互连组成。5 条 VL(VL_1 ~ VL_5)在网络中进行传输,其具有相同的最大包长 $S_{\max}$ = 4 000 bit 和带宽分配间隔 BAG = 4 000 μs,网络带宽为 100 Mbit/s,交换机技术延迟为 16 μs。

利用仿真模型获得的最小延迟、平均延迟、最大延迟和文献[21]中的真实最坏延迟、组网络演算最坏延迟结果如表 2 所示。

对比可见,仿真获得的延迟最大值逼近真实最坏延迟,并且所有仿真延迟均小于组网络演算最坏延迟上界,位于理论约束范围之内。由于此例中流量数目较少,仿真平均延迟接近于最小延迟。通过此实验仿真模型状态遍历的完备性得以验证。

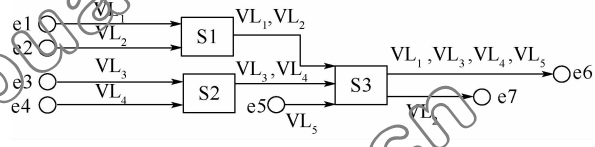


图 7　简单 AFDX 拓扑

Fig. 7　Simple AFDX topology

表 2　端到端延迟对比

Table 2　Comparison of end-to-end delay　μs

VL	最小延迟	平均延迟	最大延迟	真实最坏延迟[21]	组网络演算最坏延迟[21]
1	152.14	152.76	267.47	272	273.6
2	152.14	152.42	190.12	192	192.4
3	152.17	153.10	254.06	272	273.6
4	152.16	152.82	271.10	272	273.6
5	96.08	96.57	160.15	176	177.6

3.2　实验配置

参照波音 787 飞机典型 AFDX 配置,构建 AVB 与 AFDX 网络仿真模型,拓扑结构如图 8 所示,由 8 个交换机(S1 ~ S8)和 9 个端系统构成互连网络。

实验分 2 个场景进行,共配置 1 000 条 VL,具体参数如表 3 所示。网络链路传输速率为 100 Mbit/s,交换机技术延迟为 16 μs。除表 3 所示的配置信息外,2 种场景均包含源节点③到目的节点⑥的 10 条以太网 BE 流,帧长为 500 Byte。图 8 圆括号中分别为 AVB 网络输出端口对于 SR_A类流和 SR_B 类流的预留带宽 idleSlope 配置。场景 1 用于对比 AFDX 与 AVB 同优先级流的端到端延迟,共包含 950 条流量(VL_1 ~ VL_{950});场景 2 在场景 1 的基础上增加源节点⑨到目的节点⑥的 50 条高优先级流,用于分析接收端⑥在接纳高优先级流前后,低优先级流 $VL_{151\sim350}$ 端到端延迟的变化程度;然后将增加的高优先级流的优先级转换为低优先级,以观察接收端⑥在接纳低优先级流前后,高优先级流 $VL_{851\sim950}$ 端到端延迟的变化程度。

http://bhxb.buaa.edu.cn

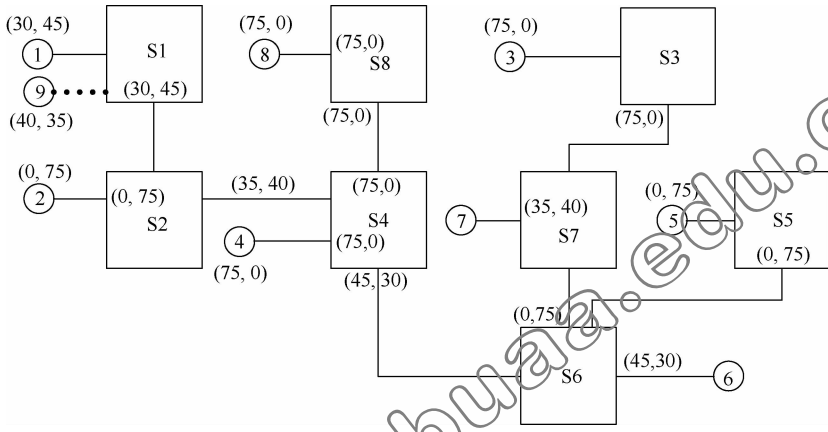


图8 网络拓扑

Fig. 8 Network topology

表3 配置信息

Table 3 Configuration information

VL_i	源节点	目的节点	帧长/Byte	AFDX		AVB		
				BAG/ms	流量类型	ServiceRate/ms	MIF	流量类型
1～50	①	②	72	2	低优先级	40	20	SR_B
51～150	①	④	172	16	高优先级	160	10	SR_A
151～350	②	⑥	800	128	低优先级	1 280	10	SR_B
351～450	③	⑦	100	8	高优先级	40	5	SR_A
451～650	④	⑧	200	32	高优先级	320	10	SR_A
651～850	⑤	⑦	372	64	低优先级	320	5	SR_B
851～950	⑧	⑥	72	4	高优先级	40	10	SR_A
951～1 000	⑨	⑥	872	32	高优先级	160	5	SR_A
951～1 000	⑨	⑥	872	32	低优先级	160	5	SR_B

4 案例分析

将相同BAG流的端到端延迟取平均数，实验结果如图9(a)、(b)所示(场景1)，AFDX高优先级流延迟均小于AVB的SR_A类流延迟。AFDX低优先级流延迟与AVB的SR_B类流量延迟对比呈现不确定性，针对$VL_{1\sim50}$和$VL_{151\sim350}$而言，AVB延迟较小，针对$VL_{651\sim850}$而言，AFDX延迟较小。2种网络的BE流延迟如图9(c)所示，AVB网络的BE延迟明显好于AFDX网络，实验结果符合理论估计。

端节点⑥接纳高优先级流$VL_{951\sim1\,000}$后(场景2)，AFDX与AVB中的低优先级流$VL_{151\sim350}$在场景1、2中平均端到端延迟结果如表4所示。

由表4可知，$VL_{151\sim350}$平均端到端延迟在AFDX中的变化率为10.25%，在AVB中的变化率为5.17%。

在$VL_{151\sim350}$中任意选取一条，对其端到端延迟结果运用累积概率分布(CDF)函数，如图10所示。可以清晰的看出，AVB中VL_{151}前后结果无

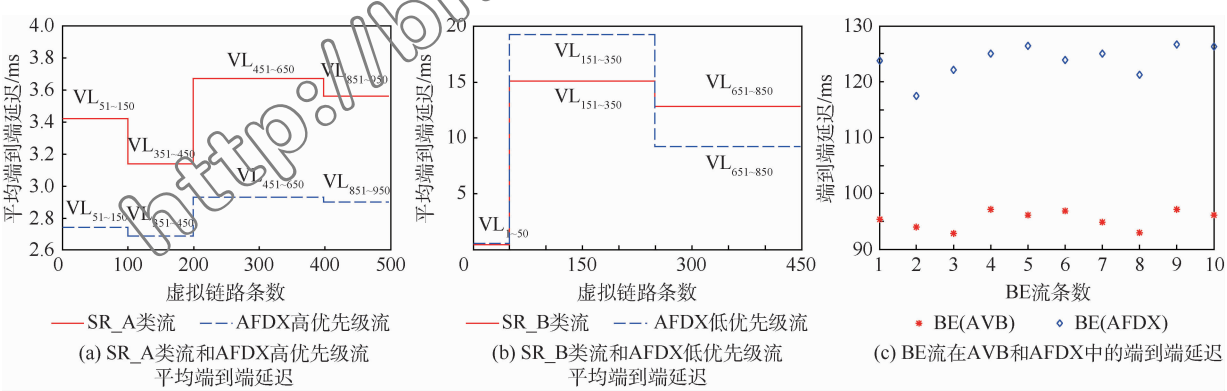


图9 AVB与AFDX流量延迟对比

Fig. 9 Comparison of traffic delay in AVB and AFDX

http://bhxb.buaa.edu.cn

太大变化,而 AFDX 中 VL_{151} 前后结果有明显波动。

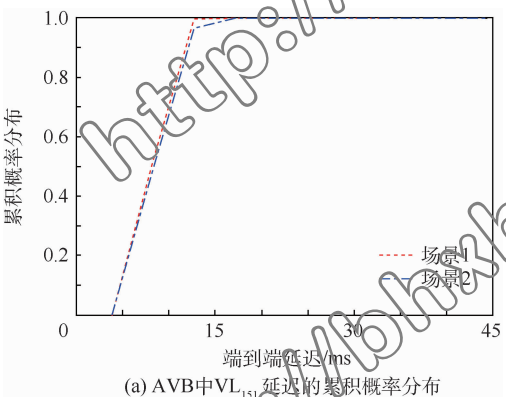
端节点⑥接纳低优先级流 $VL_{951\sim1000}$ 后,AFDX 与 AVB 中的高优先级流 $VL_{851\sim950}$ 在场景 1、2 中平均端到端延迟结果如表 5 所示。

由表 5 可知,$VL_{851\sim950}$ 平均端到端延迟在 AFDX 中的变化率为 0.38%,在 AVB 中的变化率为0.25%,低优先级流对高优先级流端到端延迟影响较小,基本可忽略不计,符合理论推导。

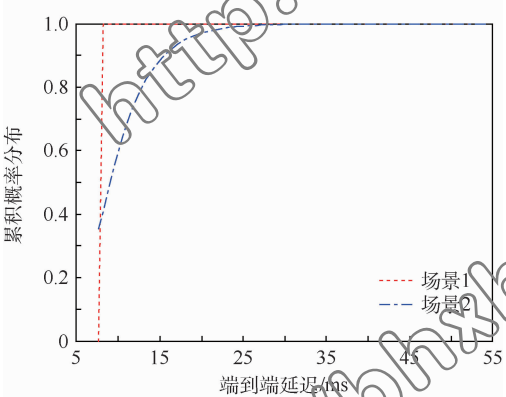
表 4　$VL_{151\sim350}$ 平均端到端延迟对比

Table 4　Comparison of average end-to-end delay for $VL_{151\sim350}$

场景	平均端到端延迟/ms	
	AFDX	AVB
场景 1	19.292	15.053
场景 2	21.270	15.831



(a) AVB中VL_{151}延迟的累积概率分布



(b) AFDX中VL_{151}延迟的累积概率分布

图 10　VL_{151} 延迟变化对比

Fig. 10　Comparison of VL_{151} delay variation

表 5　$VL_{851\sim950}$ 平均端到端延迟对比

Table 5　Comparison of average end-to-end delay for $VL_{851\sim950}$

场景	平均端到端延迟/ms	
	AFDX	AVB
场景 1	2.901	3.561
场景 2	2.912	3.570

5　结　论

1）本文从带宽约束、流量整形和调度方面对比了 AVB 和 AFDX 网络,理论分析了时间敏感流量和 BE 流量在 2 种网络中传输的性能差异。

2）从网络演算角度分析了 AVB 和 AFDX 时间敏感流量端到端延迟的抗干扰性。当网络中有突发的高优先级流量被接纳时,同接收端中低优先级流量的传输延迟会有所增加,AVB 网络中低优先级流量延迟受限于高优先级流量的帧长。AFDX 网络中低优先级流量延迟受限于高优先级流量的整个突发度;当网络中有突发的 BE 流或低优先级流量被接纳时,同接收端中高优先级流量的传输延迟影响较小,AVB 和 AFDX 网络中高优先级流量延迟受限于 BE 或低优先级流的一个最大帧的帧长差。

3）设计了 AVB 和 AFDX 行为仿真模型,对 AFDX 和 AVB 流量传输实时性的抗干扰能力进行了仿真对比分析。在典型航空电子网络上千条流量配置下,同一接收端接纳突发的高优先级流量后,低优先级流延迟的变化率在 AFDX 中为 10.25%,在 AVB 中为 5.17%;同一接收端接纳突发的低优先级流量后,高优先级流延迟的变化率在 AFDX 中为 0.38%,在 AVB 中为 0.25%;AVB 网络时间敏感消息传输实时性的抗干扰能力优于 AFDX。

后续工作将研究 AVB 和 AFDX 在航电不同分区中的异构问题,或在 AVB 中增加时间触发调度,与 TTEthernet 对比等。

参考文献(References)

[1] ARINC 664. Aircraft data network, Part 7: Avionics full duplex switched Ethernet (AFDX) network[S]. Annapolis: Aeronautical Radio, 2005: 9-18.

[2] 蒲小勃. 现代航空电子系统与综合[M]. 北京:航空工业出版社,2013:55-89.
PU X B. Modern avionics system and integration[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 55-89 (in Chinese).

[3] IEEE 802.1 AVB Task Group. IEEE 802.1 audio/video bridging (AVB)[EB/OL]. (2013-03-20)[2016-04-10]. http://www.ieee802.org/1/pages/avbridges.html.

[4] STEINBACH T, LIM H T, KORF F, et al. Tomorrow's in-car interconnect? A competitive evaluation of IEEE 802.1 AVB and time-triggered ethernet (AS6802)[C]//2012 IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-5.

[5] ALDERISI G, IANNIZZOTTO G, BELLO L L. Towards 802.1 Ethernet AVB for advanced driver assistance systems: A prelim-

http://bhxb.buaa.edu.cn

inary assessment[C]//2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-4.

[6] ZINNER H, NOEBAUER J, SEITZ J, et al. A comparison of time synchronization in AVB and FlexRay in-vehicle networks [C]//2011 Proceedings of the 9th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 67-72.

[7] 熊华钢,王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009:85-90.
XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics integration techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 85-90(in Chinese).

[8] GEYER F, HEIDINGER E, SCHNEELE S, et al. Evaluation of audio/video bridging forwarding method in avionics switched Ethernet context[C]//2013 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 000711-000716.

[9] HEIDINGER E, GEYER F, SCHNEELE S, et al. A performance study of audio video bridging in aeronautic Ethernet networks [C]//7th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 67-75.

[10] JEON S, LEE J, PARK S. Dual-path method for enhancing the performance of IEEE 802.1 AVB with time-triggered scheme [C]//2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 519-523.

[11] MEYER P, STEINBACH T, KORF F, et al. Extending IEEE 802.1 AVB with time-triggered scheduling: A simulation study of the coexistence of synchronous and asynchronous traffic [C]//IEEE Vehicular Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 47-54.

[12] ALDERISI G, IANNIZZOTTO G, BELLO L L. Simulative assessments of IEEE 802.1 Ethernet AVB and time-triggered Ethernet for advanced driver assistance systems and in-car infotainment[C]//2012 IEEE Vehicular Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 187-194.

[13] 王彤,赵琳,何锋. 航空电子音视频传输 AVB 以太网络[J]. 电光与控制,2016,23(1):1-6.
WANG T, ZHAO L, HE F. Research on audio video bridging (AVB) for avionics network[J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(1): 1-6(in Chinese).

[14] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks, virtual bridged local area networks, Amendment 14: Stream reservation protocol (SRP)[S]. New York: IEEE, 2010: 1-5.

[15] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks, virtual bridged local area networks, Amendment 12: Forwarding and queuing enhancements for time-sensitive streams[S]. New York: IEEE, 2009: 1-17.

[16] BOUDEC J Y L. Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the Internet[M]. Berlin: Springer, 2001: 7-24.

[17] CRUZ R L. A calculus for network delay. Part Ⅰ. Network elements in isolation[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.

[18] CRUZ R L. A calculus for network delay. Part Ⅱ. Network analysis[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1991, 37(1): 132-141.

[19] CHANG C S. Performance guarantees in communication networks[M]. London: Springer, 2000: 4-22.

[20] SCHARBARG J L, RIDOUARD F, FRABOUL C. A probabilistic analysis of end-to-end delays on an AFDX avionic network [J]. IEEE Transaction on Industrial Informatics, 2009, 5(1): 28-41.

[21] BAUER H, SCHARBARG J L, FRABOUL C. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach[J]. IEEE Transaction on Industrial Information, 2010, 6(4): 521-533.

[22] MANDERSCHEID M, LANGER F. Network calculus for the validation of automotive Ethernet in-vehicle network configuration[C]//2011 International Conference on Cyber-Enable Distributed Computing and Knowledge Discovery. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 206-211.

[23] BAUER H, SCHARBARG J L, FRABOUL C. Applying trajectory approach to AFDX avionics network[C]//14th Emerging Technologies & Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1-8.

[24] 代真,何锋,张宇静,等. AFDX 虚拟链路路径实时寻优算法[J]. 航空学报,2015,36(6):1924-1932.
DAI Z, HE F, ZHANG Y J, et al. Real-time path optimization algorithm of AFDX virtual link[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1924-1932(in Chinese).

作者简介:

赵琳 女,博士研究生。主要研究方向:实时网络。

何锋 男,博士,讲师。主要研究方向:航空电子综合、实时调度、实时网络。

熊华钢 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:航空电子综合、机载网络。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Comparison of real-time anti-jamming transmission for avionics AFDX and AVB

ZHAO Lin, HE Feng*, XIONG Huagang

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: AVB is considered to meet the demands of audio video transmission in future avionics system, which is a real-time multimedia network and has become a candidate for in-vehicle embedded systems. Comparative study on AFDX and AVB is implemented. First, standards of AVB and AFDX are compared. Second, the method for end-to-end delay in AVB and AFDX is discussed by network calculus. Then the elements interfering real-time transmission are analyzed depending on different transmission scenarios. Conclusions are verified by simulation. In typical networking with 1 000 virtual links, the results show that the end-to-end delay of high priority traffic in AFDX is smaller than that in AVB; the advantage and disadvantage of end-to-end delay for low priority traffic exist in both AVB and AFDX. But influenced by the burst 50 low priority streams (each with 0.22 Mbit/s bandwidth), the variation rate of average end-to-end delay for high priority traffic is 0.25% in AVB and 0.38% in AFDX; influenced by the burst 50 high priority streams (each with 0.22 Mbit/s bandwidth), the variation rate of low priority traffic is 5.17% in AVB and 10.25% in AFDX. Real-time anti-jamming transmission of time-sensitive information in AVB is superior to AFDX.

Keywords: avionics network; audio/video bridging (AVB) network; avionics full-duplex switched Ethernet (AFDX); real-time; anti-jamming

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2016-12-01; **Accepted**: 2017-02-24; **Published online**: 2017-04-11 18:16

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170411.1816.002.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61301086); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (YWF-15-GJSYS-055)

* **Corresponding author**. E-mail: robinleo@buaa.edu.cn